21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材



平板显示技术基础



王丽娟 编 著

介绍平板显示技术的基本原理及先进技术
彰显光电及显示领域经验
突出先进显示技术的制作工艺及最新发展
符合指导性专业规范要求







说　明

本书电子版仅提供给高校任课教师使用，如有任课教师需要全本教材浏览或需要本书课件等相关教学资料，请联系北京大学出版社客服，微信手机同号：15600139606，扫下面二维码可直接联系。

由于教材版权所限，仅限任课教师索取，谢谢！



21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

平板显示技术基础

王丽娟　编著



内 容 简 介

本书主要讲述当代显示的主流液晶显示器，高端显示的有源矩阵液晶显示和薄膜晶体管；新一代显示的代表有机发光显示；以及未来时尚显示的柔性显示、3D显示、触摸屏技术等新型的显示技术。分别从显示原理、器件结构、工艺技术及驱动方案等方面深入浅出地阐述，并分析面临的问题和技术挑战，提供了一套学习现在、发展明天、展望未来的整体知识体系。

本书适合作为电子类等相关专业本、专科学生的教材，也可供技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

平板显示技术基础/王丽娟编著．—北京：北京大学出版社，2013.4

(21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-22111-2

Ⅰ.①平… Ⅱ.①王… Ⅲ.①平板显示器件—高等学校—教材 Ⅳ.①TN873

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第026410号

书　　　名：平板显示技术基础

著作责任者：王丽娟　编著

策 划 编 辑：程志强　郑　双

责 任 编 辑：程志强

标 准 书 号：ISBN 978-7-301-22111-2/TN·0097

出 版 发 行：北京大学出版社

地　　　址：北京市海淀区成府路205号　100871

网　　　址：http://www.pup.cn　新浪官方微博:@北京大学出版社

电 子 信 箱：pup_6@163.com

电　　　话：邮购部62752015　发行部62750672　编辑部62750667　出版部62754962

印　刷　者：

经　销　者：新华书店

787mm×1092mm　16开本　27印张　630千字

2013年4月第1版　2013年4月第1次印刷

定　　　价：52.00元

目　　录

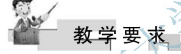
第1章

平板显示技术简介

随着科技的发展，平板显示技术也不断推陈出新，从最开始的阴极射线管显示技术发展到现在以液晶为主流的平板显示技术，以及不久的将来再到有机发光显示技术等，都给人们的生活带来了巨大的变革，使得人们的生活更加舒适方便。通过对本章的学习，可以掌握平板显示技术的内容、种类。



- 了解平板显示技术的定义；
- 掌握平板显示技术的种类；
- 了解平板显示技术的特点；
- 掌握平板显示技术的性能参数。



知识要点	能力要求	相关知识
显示技术的发展	了解平板显示的发展	CRT 显示器
显示技术的种类	(1) 掌握显示技术的种类 (2) 了解各种平板显示的结构 (3) 掌握各种平板显示的原理	平板显示器
显示器的性能对比	(1) 了解各种平板显示器的性能 (2) 了解各种平板显示的用途	
显示器的性能参数	(1) 了解各种性能参数的定义 (2) 了解各种性能参数的作用	



推荐阅读资料

[1] 高鸿锦，董友梅．液晶与平板显示技术[M]. 北京：北京邮电大学出版社，2007.

[2] 谷千束．先进显示器技术[M]. 北京：科学出版社，2002.

[3] 中华液晶网．http：//www.fpdisplay.com/.



基本概念

平板显示器：Flat Panel Display，缩写为 FPD，是显示器件屏幕对角线的长度与整机厚度之比大于 4∶1 的显示器。

CRT 显示器：Cathode Ray Tube，为阴极射线管，是一种利用高能量电子束轰击荧光屏发光的显示器。

1.1 显示技术的发展

在过去 10 多年里，信息技术的空前发展宣告了第三次工业革命的来临，计算机技术和计算机网络快速发展，移动电话以及电子贸易蓬勃发展，这些新通信技术的革命造就了一个“信息时代”的 21 世纪。作为信息时代的一个重要环节就是信息显示技术，显示技术在人类知识的获得和生活质量的改善方面扮演着重要的角色。显示技术是人机联系和信息展示的窗口，广泛应用于娱乐、工业、军事、交通、教育、航空航天，以及医疗等社会的各个领域。



引例：京东方 110 英寸全球最大尺寸的超高清显示屏亮相

2012 年 11 月 16 日，全球最大尺寸(110 英寸)UHD 级超高清显示屏亮相第十四届高交会，是我国在平板显示领域的最新突破性进展。集众多高端技术于一体：超大尺寸面板拼接曝光技术、超大尺寸先进工艺制程技术、高帧速面板设计技术、超大尺寸拼接镜像同步扫描技术、120Hz 高频驱动技术、局域动态背光技术等先进技术。具有 178°超宽视角、4 倍于 FHD 的 UHD(Ultra HD)超高清级别(分辨率高达 3840×2160)，给现场观众身临其境般的逼真视觉享受。亮度高达 1000nits，10bit 色彩技术可呈现 10.7 亿色，最大程度上还原了真实色彩，如图 1.1。该款显示屏计划在京东方 8.5 代线投产，可广泛应用于办公场所、大型数字显示牌、高端影院等处。

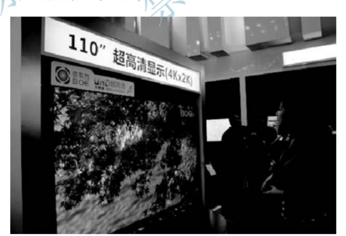


图 1.1 京东方 UHD 级超清显示器(京东方)

1.1.1 显示技术的飞速发展

进入 21 世纪，人们需要性能更好、更能符合未来生活需要的新一代显示技术，以迎接所谓的“4C”，即计算机(computer)、通信(communication)、消费类电子(consumer



electronics)、汽车电子(car electronics)以及“3G”(第三代手机)时代的到来。纵观移动通信设备的演变，充分展现了显示技术飞速发展的历程，如图 1.2 所示。



图 1.2　移动通信设备的演变

1.1.2　显示技术发展的时代

1897 年，德国人布劳恩发明了第一只阴极射线管，实现了电信号到光信号的转变，称为信息显示技术的起点。因此，显示技术的发展划分为 3 个时代。

1. 第一代显示——CRT 显示

阴极射线管(CRT)显示是第一代显示器，改变着人类的生活，辉煌了半个多世纪，现在已经十分成熟，再实现技术上的新突破非常困难。CRT 显示由于体积庞大、功耗高、有辐射、无法应用到移动电话及笔记本计算机等便携式设备中等问题，生存和发展都受到平板显示技术严峻的挑战。而且，CRT 显示在数字化、高分辨率、小型化、轻薄方面不如平板显示器，除了电视机和显示器外，很少涉及其他应用领域，制约了其发展。当前平板显示技术的成本也逐渐下降，CRT 显示技术的唯一成本优势也变得越来越不明显。CRT 与平板显示器的对比，如图 1.3 所示。

在 20 世纪 80 年代，拥有 CRT 电视是很多人的梦想。在 20 世纪 90 年代，CRT 电视已变得家喻户晓；在 21 世纪初，孩子们已经不知道什么是 CRT 电视了。CRT 显示器为了在发展中寻求生存，在竭力开发新的超薄型 CRT，但也无法摆脱逐渐衰退的局面。目前，第一代显示已接近尾声，逐渐退出了历史的舞台。

2. 第二代显示—— LCD 显示

液晶显示被誉为第二代显示，具有体积小、重量轻、省电、无辐射、便于携带等优点，是现今人们最熟悉、最常见的显示器，占据平板显示市场份额的 80%以上，产品范围覆盖整个应用领域，在当今时代锋芒毕露，成为平板显示领域的主流。

回顾液晶显示技术的发展历程是艰辛曲折的。1968 年，第一台基于动态散射效应的液晶显示器诞生。1985 年液晶显示器产业开始商业化。1986 年开始，进入液晶显示器的





图 1.3 CRT 显示和平板显示的对比

早期发展阶段，主要用于电子表、计算器等方面。20 世纪 80 年代末 90 年代初，STN-LCD 及 TFT-LCD 生产技术的出现使 LCD 产业进入到高速发展期，但存在画面延时，色彩还原不够真实，可视角度低等缺点，仍然生存在 CRT 显示器阴影下。2001 年以后，LCD 技术开始走向成熟发展之路，2003 年 LCD 成本大幅下降，响应时间提高，扩展了 LCD 的应用。从 2004 年开始，LCD 已经开始慢慢取代 CRT 显示器成为显示设备的主流。2005 年广视角技术的应用解决了由于可视角度不同造成的色彩衰退现象。在各项技术发展的同时，也逐渐改善了背光源技术、倍频刷新和画面插黑技术、高色域技术等。科技永远向前进步，LCD 技术的发展使人们的未来更多广阔和光明。

当前液晶显示电视最大的画面尺寸已经做到 108 英寸，机身尺寸为 2572mm×1550mm×202mm，分辨率为全高清 1920×1080 像素，夏普的 ASV 液晶电视如图 1.4 所示。苹果让手机和 iPad 不断推陈出新，在硬件上精致到了极点，配备的仍是液晶显示屏，在很长一段时间还将称霸市场。触控和 3D 技术的飞速发展不断吸引着人们的眼球，如图 1.5 所示。这些都标志着液晶显示器正处在发展的兴旺阶段，未来将还会持续很长时间的热度。



图 1.4 夏普的 108 英寸液晶电视



图 1.5　日商电子集团 52 英寸裸眼 3D 液晶显示器



小知识：倍频刷新与画面插黑技术

倍频刷新技术是指在原本仅有的 60Hz 画面更新率提升到了 120Hz。在提升画面更新率的同时，也要利用画面处理器来内插画面。在两幅画面中间插入一幅新画面，补充动态的不足。当前主流的面板画面更新率在每秒 120 张以上时，才能实现倍频刷新。

画面插黑技术是指在画面更新率倍增的同时，两幅画面之间插入全黑的画面，消除肉眼的视觉残留现象。

3. 新一代显示——OLED 显示

尽管液晶显示随着技术和工艺的不断成熟，已经从小屏到大屏逐步占领了所有显示设备领域。但随着新技术的不断涌现，被取代只是时间问题。有机发光显示在近几年大放异彩，在手机、平板计算机、数码相机、平板电视等产品中逐渐看到了 OLED 屏幕的身影，在新一代显示中崭露头角，被业界人士认为是最有前景的新一代显示器。

有机发光显示(Organic Light Emitting Diode，OLED)。具有自发光特性、对比度高、响应时间快、可视角度大、色彩饱和度好、超薄等特点，比液晶显示器性能更优越。像液晶显示一样，OLED 的发展由 PMOLED(Passive Matrix OLED，无源矩阵有机发光显示)发展到 AMOLED(Active Matrix OLED，有源矩阵有机发光显示)技术。最初应用到小型移动式设备上，随着基板尺寸的慢慢变大，开始应用到笔记本计算机、显示器以及平板电视上。当前韩国三星和 LG 分别开发出 55 英寸的 AMOLED 电视，标志着 OLED 开始走向大尺寸应用。



三星的 AMOLED 手机与苹果的液晶手机 iPhone 竞争

2010 年，三星发布了 Galaxy S 系列手机，采用自己独有的 AMOLED 屏幕，具备超薄、大屏幕、高分辨率、大可视角度、高对比度、高色彩饱和度，且集触控一体化，成为苹果的液晶手机 iPhone 最强的竞争对手。

4. 未来显示——柔性显示

未来的显示是那种薄如纸可以随意折叠的显示器。不论是即将消失的 CRT，还是当今时代主流的 LCD，都属于传统的刚性显示器。而柔性显示器具有耐冲击、抗震能力更强；重量轻、体积小，携带方便；采用类似报纸印刷的卷带式工艺，成本更加低廉等优



点。试想可以卷曲、掉在地上不容易损坏、超轻的显示器，或者可以戴在手腕上像手表那样观看影像的未来显示器，是多么让人渴望。

从2000年开始，由于新材料、新显示技术的出现，为柔性显示的发展注入了一股强大的活力，世界许多国家为了能够进一步掌握未来发展的机会，纷纷开始了柔性电子领域的研究，很多显示样机争相亮相。

当今柔性显示还处在产业化的前夜，真正能够达到商品化阶段还有相当一段距离。面临的技术瓶颈和挑战主要有：①性能差，过高的工作电压、较低的载流子迁移率、不稳定的材料和器件特性，使得柔性显示器的性能还需要提高；②寿命低，柔性显示多采用有机材料、结构松散、产品寿命短，按每天使用5小时计算，1～2年内产品的寿命就到期了，在生产和使用中也容易损坏；③生产设备不成熟，造成产品成品率低，成本和价格也相应上升，阻碍了产业化的进展；④相关高科技技术还未匹配，如柔性的衬底生产加工技术、纳米电子技术、柔性的半导体封装技术等还未成熟。整体来看，柔性显示技术的研究尚在起步阶段。


引例：**三星的柔性AMOLED**

2010年，三星发布的4.5英寸柔性AMOLED分辨率为800×480像素，厚度仅为0.3mm，在弯曲的时候不会损害、也不会让图像扭曲失真，在屏幕卷曲成直径1cm的圆筒状时，仍能正常工作，具备目前手机屏幕所没有的耐冲击性，在观看视频下用锤子敲击数千下仍能显示。

2012年三星发布可弯曲的柔性显示器，意味着用户手机或者平板显示屏掉在地上后也不容易损坏，如图1.6所示。

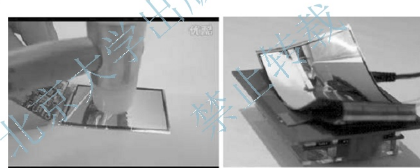


图1.6　三星的柔性AMOLED(zol.com.cn)

2009年，韩国LG显示器开发出可穿戴式OLED显示器，如图1.7所示。画面尺寸为4英寸，QVGA具有320×240像素，100ppi，167万色显示，衬底基板采用76μm的钢片，面板整体厚度0.3mm，可弯曲的曲率半径为2英寸，重8g。OLED的有源矩阵驱动采用的是非晶硅TFT。



图1.7　韩国LG的可戴在手腕上的柔性OLED

1.2　显示器的种类

显示技术研究的内容很多，主要有各种显示方式的基本原理和结构、各种发光材料发光机理的研究、各种显示器件的制作工艺、显示器件的驱动与控制技术，以及显示器件上、下游产业链中所用的各种材料。因显示器的种类不同，显示技术研究的内容也不同，本节主要介绍显示的种类、简单原理和结构。

1.2.1　显示器的分类

显示器的组成部分包括电光转换效应而形成图像的显示器件、周边电路及光学系统等三大部分。根据显示器件的不同，显示器有多种分类方法。按显示器显示图像的方式，分为投影型、空间成像型和直视型 3 种。按显示器的形态，分为阴极射线管显示器和平板显示器两种。按发光方式，分为主动发光型和非主动发光型两种。按是否含有源器件，分为无源矩阵和有源矩阵两种。每种显示器又包括很多种。

1. 投影型显示器

投影型显示器是用显示器显示图像后，再经光学系统放大后投影到屏幕上的一种显示器，具有大屏幕、高清晰、成本低的优势，分背投型和前投型两种。背投电视可以做到 80～100 英寸，前投电视可以做到 200 英寸。显示尺寸大幅度增大，但整机成本不用像其他平板显示那样大幅度增大。根据使用的图像源不同，投影型显示器分为 CRT 投影技术、LCD 投影技术、DLP 投影技术。

1）CRT 投影技术

CRT 投影显示利用 CRT 和光学系统组成投影管，光线投射到屏幕上显示图像，是实现最早、应用最为广泛的一种投影技术。如三枪投影机，采用了 3 个投影管，把输入信号源分解成红、绿、蓝三基色，控制电子束分别打到 CRT 的荧光粉发光，光线投射出来，经光学透镜系统放大、汇聚、在屏幕上显示彩色图像，如图 1.8 所示。

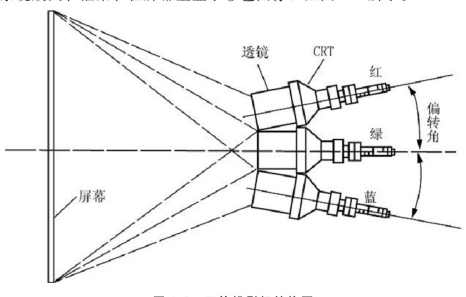


图 1.8　三枪投影机结构图

CRT投影机由于亮度低，只适合安装在环境光较弱的场所，且机身庞大、不宜搬动，在投影方面已逐渐被LCD和DLP投影技术取代。

2）LCD投影技术

LCD投影技术利用液晶的电光效应改变液晶分子在电场下的排列状态，从而影响液晶像素单元的透光率和反射率，产生不同灰度级及颜色数的图像，主要有液晶板投影机、液晶光阀投影机和反射式液晶投影技术。

液晶板投影机利用液晶面板作为成像器件，并用电寻址的投影技术。液晶光阀投影机利用CRT光和液晶光阀作为成像器件，并用光寻址的投影技术。二者都是利用了液晶的透射特性。以三片式液晶面板投影机说明透射式投影原理。首先，利用光学系统把强光通过分光镜形成RGB三束光，分别透射过RGB三色液晶屏；接着，信号源调制液晶屏，通过控制液晶单元的透光或阻断来控制光路；然后，经过三片液晶屏的光线在棱镜中汇聚，由投影镜头投射到屏幕上实现彩色显示，如图1.9所示。目前三片式是液晶投影机的主要机型。

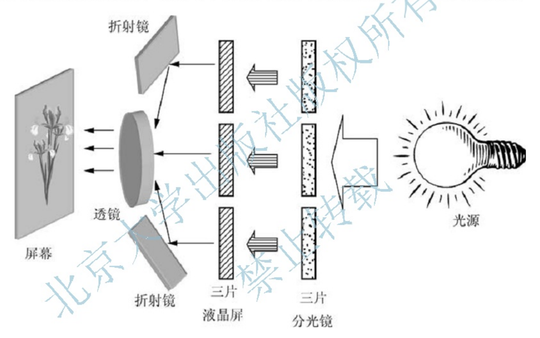


图1.9　三片式LCD投影显示原理

反射式液晶投影技术是利用液晶的反射特性，用LCOS面板调变由光源发出来的光线，反射后投入到屏幕上的一种投影显示技术。与前两种不同的是不再利用光源穿过LCD来调控光线，而是利用了LCOS的反射进行调控光线。LCOS是Liquid Crystal On Silicon的缩写，是在半导体硅上的液晶显示。LCOS的优点是可大幅度降低成本，具有高清晰度。与一般的TFT LCD面板不同的是，TFT LCD的上下基板都是玻璃，而LCOS面板的上基板是玻璃，下基板是半导体硅材料，实际上是LCD与半导体工艺的结合。

3）DLP投影技术

DLP投影技术(Digital Light Processing technology)是数字光处理器将表面数字微晶装置作为反射镜，将图像投影到屏幕上的一种投影显示技术，如图1.10所示。数字光处理器由光源、镜头、色轮、DMD组成。表面数字微晶装置(Digital Micromirror Device，DMD)，上面带有数万只非常微小的可动镜片，取代传统液晶投影机中的液晶面板，负责呈现图像。色轮是DLP的色彩来源，采用红、绿、蓝三原色或者采用红、绿、蓝、白四色混色后显示各种

色彩。DLP投影技术原理是根据电流控制DMD上的微小镜片的角度，光源的光线经色轮混色后照射到DMD上，被反射，经镜头合成需要的图像呈现在屏幕上。

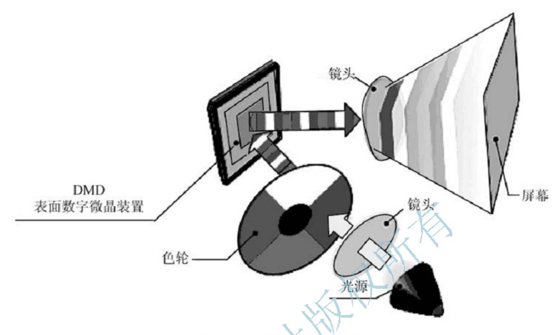


图 1.10　DLP投影技术原理

2. 空间成像型显示器

空间成像型显示器是空间虚拟图像，也是投影显示的一种，代表技术是头盔显示器(Head Mounted Display，HMD)和全息显示器。头盔显示器是虚拟现实系统中重要的视觉设备，由两个显示器和位置跟踪器组成。显示原理为：①两个彩色液晶显示器与计算机相连，由程序控制输出不同的图像，并根据人眼的视差原理组合成可在人脑中产生的三维立体图像；②位置跟踪器能够跟踪头部移动，获得头部6个自由度的移动信号并将这些动态信号输入计算机，计算机根据头部位置和移动方向的变化能及时匹配并输出相应的图像。

头盔显示器能模拟不同观察角度的真实景象，还能屏蔽来自真实世界的干扰光线，能感受到真实的视觉效果，如图1.11所示。



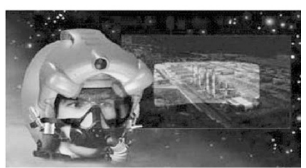


图 1.11　头盔显示器(www.chinaqking.com)



小提示：头盔显示器可以为飞行员安上慧眼

2007年，视觉系统国际公司设计的头盔显示器系统在F—35战机上进行了首次飞行实验。飞行员的



体验是“简直妙不可言”，堪称为飞行员安上了慧眼。其优势在于：①跟踪显示，为飞行员显示关键的飞行状态数据、任务信息、威胁和安全状态信息，具有一个非常强大的头部跟踪功能与图像处理功能；②及时提示，十分及时地为飞行员发出视觉提示信息，告诉飞行员应该关注的区域；③降低了重量。

3. 直视型显示器

直视型显示器是当前显示器的主流，根据显示原理和发光类型又分为很多种。主动发光型显示器是指利用电能使器件发光，显示文字和图像的显示技术。非主动发光型显示器又称被动发光型显示器，是指器件本身不发光，需要借助于太阳光或背光源的光，用电路控制外来光的反射率和透射率才能实现显示。已产业化和比较具有发展前景的显示器件，如图 1.12 所示。除了传统的阴极射线管显示器外，其他显示器件都是平板显示器(FPD)。



图 1.12 显示器的分类

1.2.2 阴极射线管显示器

阴极射线管(Cathode Ray Tube，CRT)显示器，是利用电子束轰击荧光粉实现显示的，改变着人们的生活，在技术飞速发展的时代占据着重要的历史地位。

1. CRT 显示器的发展

1897 年，德国物理学家布劳恩(Braun)发明了阴极射线管，并首次应用在一台示波器上。1908 年，英国人提出作电视的显示器件。1924 年，Danvillier 开始电视图像显示器的试验。1938 年，德国人 W. Fleching 申请彩色显像管的专利。1950 年，美国无线电公司(RCA)完成了阴罩式彩色 CRT 的研制，CRT 电视机诞生。现在，人们对于 CRT 显示器的研究已经非常成熟，发展方向也向着高分辨率、高色彩度的方向发展。低价格、高显示容量、高画质、高色彩度等特性几乎成了 CRT 显示的标志。阴极射线管显示器如图 1.13 所示。

2. CRT 显示器的结构

CRT 显示器主要由电子枪、偏转线圈、阴罩、荧光粉层和圆锥形玻壳五大部分组成，如图 1.14 所示。电子枪采用单电压型，电压 15～25kV，最大电流 100～150μA，发射并





图 1.13　阴极射线管显示器

加速电子，产生高能电子束。偏转线圈让电子束在水平方向和垂直方向同时偏转，使整个荧光屏上的任何一点都能发光。不加偏转线圈时，经过加速、聚焦的具有很高动能的电子束轰击到荧光面时，仅能在荧光屏中心位置产生亮度很高的光点，难以成像。阴罩板上有数十万个小孔，保证每个电子束在整个扫描过程中都能达到自己的基色荧光粉点上。CRT显示器的屏幕经历了从球面、平面直角、柱面再到纯平面的过程，对应了阴罩技术的发展。

3. CRT 显示原理

电子枪发射出电子束，用视频信号调制电子束流，用电子透镜的聚集系统来汇聚电子束，在荧光屏上将电子束聚焦。几经聚焦、调控的电子光束打在荧光粉上时便会产生亮点。通过控制电子束的方向和强度可产生不同的颜色与亮度。当显示器接收到由计算机显示卡或由电视信号发射器所传出来的图像信号时，电子枪会从屏幕的左上角开始向右方扫描，然后由上至下依次扫射下来，如此反复地扫描即可构成人们所看到的影像。

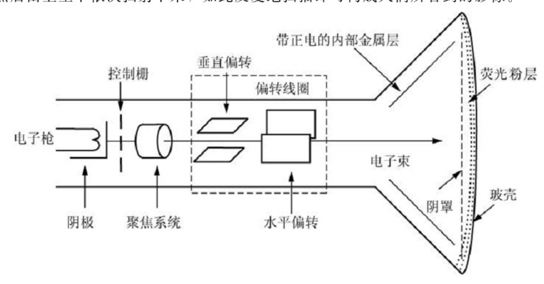
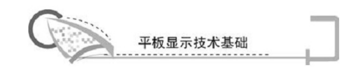


图 1.14　CRT 显示的结构及原理



1.2.3 等离子体显示

等离子体显示器(Plasma Display Panel，PDP)是利用气体放电发光激发荧光粉实现显示的一种主动发光型平板显示器，具有薄型、大屏幕、色彩丰富的特点，在大屏幕电视市场占有一席之地。

1. PDP 的发展

早在 1927 年，美国贝尔实验室制备了一台 60cm×75cm、具有 50×50 个发光单元的气体放电发光显像装置来演示直播电视，这是最早的等离子显示器。在 1964 年，美国伊利诺大学教授 Bitzer 和 Slottow 有了突破性的发现，即在电极和放电气体之间加上一层电解质可以实现电容限流，获得记忆的效果。同时，Bitzer 等将利用交流气体放电现象发明的显示屏幕称为等离子体显示屏。该发明在 1966 年列入美国年度 100 项工业发明中。随后相继发明扫描等离子体显示器和直流等离子体显示器，是单色和多色等离子体显示器的基本类型。

2. PDP 放电单元的发光原理

等离子体显示器是在两块配置了电极的玻璃基板之间充上大于 0.5 个大气压的氙(Xe)、氖(Ne)、氦(He)等混合气体，周围采用密封构造，利用混合气体在真空中放电形成紫外光，紫外光激发红绿蓝荧光粉，发出可见光实现显示的。上下基板电极间隙约为 100μm，紫外光是利用 147nm 的原子发光及 180nm 附近的分子发光组成的，如图 1.15(a)所示。

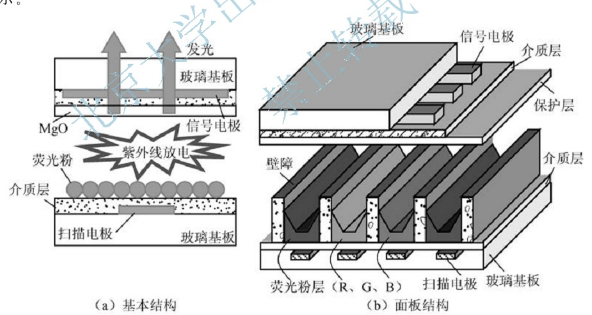


图 1.15 PDP 放电型的基本结构和面板结构

3. PDP 的显示面板结构

PDP 的显示面板由排列成矩阵型的像素点阵构成，每一个像素由红绿蓝三基色的子像素构成。子像素是独立的，由单个放电单元独立进行放电发光。面板结构如图 1.15(b)所示。

(1) 在下玻璃基板上垂直配置扫描电极，上面用介质层覆盖。

(2) 光刻制作壁障，用来隔开各个像素，防止放电之间的干扰。

(3) 壁障外形成彩色荧光粉(红、绿、蓝)。

(4) 在上基板上水平配置信号电极，是用来为维持放电控制显示亮度的。电极外面覆盖介质层。再涂覆一层 MgO 保护层，用于得到稳定的放电和较低的保持电压，并延长显示器寿命。

矩阵型的条形扫描电极和信号电极彼此正交，交点处构成一个放电单元，等效电路如图 1.16 所示。扫描电极在某一行加电压，信号电极在某一列加显示信号。交叉电极上加电压 100～200V，气体放电产生等离子体，发出紫外光，激励荧光粉发光，实现图像显示。在行和列电极之间的每一个 PDP 像素就是一个小的放电单元，当相邻两个子像素距离很小时，会出现误放电。因此，PDP 显示子像素间距减小到 0.1mm 以下是很困难的，增大像素面积非常容易，不适合小屏幕显示，但更适合大屏幕显示。

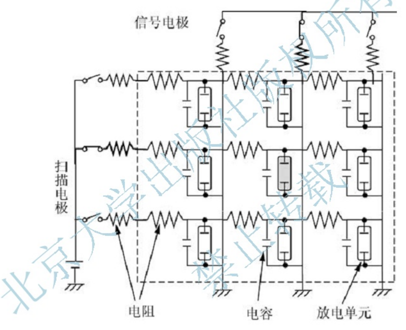


图 1.16　PDP 的等效电路图

4. PDP 的特点及面临的问题

等离子体显示器的优点有许多：①利用气体放电发光，是主动发光型显示器，亮度高，图像清晰；②放电间隙为 0.1～0.3mm，便于实现薄型化为平板显示器；③视角大、体积小、重量轻，适合大屏幕显示；④显示容量大，满足高清晰度电视要求；⑤制作工艺易于批量生产，有利于形成产业。因此，等离子体显示器主要应用在数字电视、高清晰度电视、多媒体显示上。但仍面临很多问题。

1) 烧伤问题

在 PDP 显示器中，存在等离子体对荧光粉的烧伤问题，尽管有 MgO 的保护层，但 PDP 的发光性能仍随发光时间而明显下降。例如，PDP 若用于桌面计算机显示器，在显示屏上方一直显示的 Windows 菜单区域，荧光粉长时间受到等离子体的轰击，发光能力很快衰减。在显示其他画面的时候，显示屏上方会存在 Windows 菜单的潜像。



2）壁障结构

PDP 显示器中为防止像素间的放电干扰，必须采用障壁结构，只适用于比较大、清晰度较低的显示器。

3）成本高

PDP 的等离子体是在高压下产生的，某些像素要获得高亮度还需要更高的瞬时功率。高瞬时功率及瞬时高压对于集成电路是致命的。对于大规模制作的 PDP 显示器，80％的成本要消耗在集成电路上。降低成本的措施有改进驱动方法，简化电路和提高电路集成度等方法。

4）发光效率低

PDP 显示器的单元像素变小时，发光效率会降低，亮度也会下降。2006 年，PDP 的发光效率约为 1.8 lm/W，较 CRT 明显低很多，甚至低于 LCD 的发光效率。近年，等离子体显示器在许多应用领域取得突破性进展。提高发光效率的方法有改进器件结构、采用新的气体放电模式、提高 147nm 紫外照射下的量子效率等。

1.2.4 场致发射显示

场致发射显示器(Field Emission Display，FED)是一种用冷阴极在高电场作用下发射电子，轰击涂覆在屏幕上的荧光粉发光实现显示的。与 CRT 显示原理类似，都是工作于真空环境，靠发射电子轰击荧光粉发光的主动发光型显示器。

1. FED 的发展

场致发射理论是 1928 年由 R. H. Fowler 和 W. Nordheim 共同提出的。直到 1968 年，C. A. Spindt 利用半导体技术制作了场发射电极器件，才真正开始了场致发射显示的研究。美国斯坦福国际研究所首先利用薄膜和微加工技术制作出了 FED 显示所需的阵列状微尖锥结构。1991 年，法国的 LETI CENG 公司在第四届国际真空微电子会议上成功展示了一款运用场发射电极技术制备的显示器，让 FED 正式进入到平板显示行业。韩国的三星公司也研制出了 30 英寸数字电视所用的 FED 显示屏。

2. FED 的结构及原理

尖锥阴极型彩色显示 FED 的结构如图 1.17 所示，由阳极基板与阴极基板构成。阳极基板上为红、绿、蓝三基色荧光粉条，为了保证色纯，三基色之间由黑矩阵隔开，阳极采用通明的氧化物导电层；阴极基板由行列寻址的尖锥阵列和栅极构成，栅极制作成孔状。两基板之间充有隔垫物，用来抵抗大气压力。在基板之间用低熔点玻璃胶封住。为了维持器件中的真空度，器件中应放置合适的消气剂。

FED 显示原理：①在尖锥阴极与栅极之间加低电压，小于 100V，实现对阴极发射电子的调制；②由于电极的间距很小，在尖锥阴极的尖端会产生很强的电场。电子在强电场下由于隧道效应从金属内部穿出进入真空中；③在上基板的阳极上加高电压，电子加速获得能量轰击阳极基板上的荧光粉，得到高亮度的发光。

FED 的工艺与 LCD 的工艺类似，采用玻璃衬底，微尖锥阴极的制作过程采用薄膜沉积和两步光刻工艺实现。先光刻微孔阵列，用紫外步进曝光机，光刻精度小于 1.5μm，然后蒸发和刻蚀制造微尖。要注意是微尖锥和栅极之间不能短路。

（a）整体结构

（b）断面结构

图 1.17　FED 显示的整体结构与断面结构

3. FED 和 CRT 的区别

1）FED 是阵列型发射源

CRT 只有一个电子束，或者彩色显示有 3 个电子束，利用电磁场偏转使电子束扫描整个荧光屏。FED 中电子发射源是一个面矩阵，有数十万个主动发光的尖锥阴极阵列。荧光屏像素与阴极电子发射源是一一对应的。

2）冷阴极发射

CRT 是利用电子枪的热电子发射；而 FED 采用微尖型阵列平面电场作用下的冷阴极发射代替了热阴极的电子源，电场小于 100V，电场强度大于 5×10^{7} V/cm。FED 不

使用热能，发射出的电子束能量分布范围比传统热电子束窄，亮度高，具有更优秀的特性。

3）平板显示

CRT 由于使用热电子枪，为了使电子束获得足够的偏离和扫描，必须有一定距离才能打到荧光屏上，体积又大又厚又重。FED 的荧光点到阴极的距离小于 3mm，是平板显示。

小知识：热电子发射和冷发射的区别

热电子发射是利用加热物体提供能量使电子从物体表面逸出的过程。当物体温度升高，电子的无序热运动能量随之增大。升高到一定程度，电子克服体内的束缚力从物体表面逸出，发射出来进入真空。

冷阴极发射是一种场致电子发射的过程，又称自发射。当物体表面电场加强，不需要加热，阴极体内的电子在电场下获得足够的能量后，克服体内的束缚力，利用隧道效应从表面发射出来进入真空。

4. FED 的特点

从理论上讲，FED 同时具有 CRT 和 LCD 的优点，既是平板显示器件，又是利用电子束轰击荧光粉主动发光的显示器件。信号的调制是在低电压低电流下进行的，对集成电路没有特别的要求。但是尖锥阴极型 FED 生产成本太高，只停留在小屏幕显示器上，主要是军用应用，未能进入大屏幕及消费领域。

近年来采用碳纳米管作为电子发射阴极，去掉了调制栅极，在阳极和阴极之间用矩阵的方式实现图像显示的场发射显示器发展得很快。但是，由于碳纳米管的随机排列和性能的随机分布，使整个像素上阴极发射能力存在差异，导致图像不均匀。目前，碳纳米管阴极显示器已有 40 英寸的显示样机，仍需解决发光均匀性的问题。

引例：画质很好的 SED 显示器

表面传导电子发射显示器(Surface-conduction Electron-emitter Display，SED)属于场致发射显示的一种，是最先由东芝公司开发的一种主动发光显示技术。显示原理是利用电子撞击荧光物质来显示画面，该技术放弃了原来的单一电子发射方式，改用大面积的电子发射板进行电子发射，使显示器件的厚度变得更薄。电子源和荧光粉的距离大大减小，耗能也降低，拥有传统 CRT 的全部优点，亮度和对比度非常高，颜色重现可达到无穷色。

1.2.5 真空荧光显示器

真空荧光显示器(Vacuum Fluorescence Display，VFD)是利用真空荧光管进行显示的主动发光型平板显示器，具有亮度高、视角广、环境适应性强等特点，近年来发展速度较快。

1. VFD 的结构与原理

由玻璃基板、阴极、栅极、阳极和在阳极表面涂布的荧光体组成，属于一种三电极结构，如图 1.18 所示。阴极采用丝状直热式氧化物，用于发射电子。栅极采用网状或者丝状结构，通过调整栅极相对于阴极的电位，电子可以通过栅极向阳极运动。阳极表面涂有荧光粉层。当栅极的电位为正时，电子向栅极运动，一部分电子穿过栅极，另一部分电子



会被栅极拦截而变成栅流，一般要求这部分电流越小越好。当阳极电压也同时为正时，穿过栅极的电子可以到达阳极，激发荧光体发光。因此，VFD需要栅极和阳极同时加正压才可以发光。

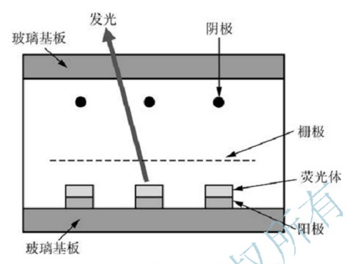


图1.18　真空荧光显示器的基本结构

2. VFD的特点和局限

VDF显示的特点是：①亮度高，蓝色的亮度为1000～2000cd/m^2，红色和蓝色的亮度为几百坎德拉每平方米，视角大；②平板显示，体积小、厚度为6～9mm，为平板显示；③工作电压低，荧光粉在几十电子伏特的能量撞击下可以发光，是一种低能电子发光显示器件。工作电压在20V左右，驱动电流为几毫安左右，普通IC可以直接驱动。

VFD由于工作电压低限制了某些性能。

（1）彩色化的限制。由于驱动电压低，大部分材料在20V左右不能发光，材料局限导致彩色化困难。

（2）阴极功耗大。阳极的电流是由阴极提供的，阳极电流越大，所需要的阴极功耗也越大。而且阴极必须一直加电压，功耗很大。

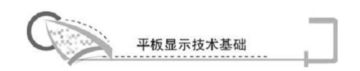
（3）分辨率受限。VFD的栅极在器件中是架空的，不可能制作太高的分辨率。

由于以上缺陷的限制，VFD主要应用在对功耗要求不大的小屏幕设备，如音视设备、微波炉等家用电器和电子秤、仪器仪表中。

1.2.6　电致发光显示器

电致发光显示器(Electroluminescent Display，EL)是利用某些材料在外界电场的作用下发光实现显示的一种主动发光显示器。其发光过程是一种将电能转化为光能的过程。电致发光按照激发过程的不同，可以分为高场电致发光和注入式电致发光。高场电致发光是在高强电场下将荧光粉中的电子或者通过电极注入的电子在晶体内部加速来获得足够的能量，又称为本征型电致发光。当发生撞击时会激发，产生激发态电子，激发态电子再回到基态时辐射发光。

注入式电致发光是指直接将电子和空穴注入材料内，当电子和空穴在晶体内复合时释放能量，能量以光能的形式释放出来。发光二极管和有机发光二极管都是注入式电致发光



器件。优点有：①可靠性高，使用寿命长，尤其是薄膜型器件；②图像清晰，画质较高；③显示画面对比度高。

1.2.7 发光二极管显示器

发光二极管显示器(Light Emitting Diode，LED)是采用无数个小发光二极管拼接组成的显示器。一个个小芯片的 LED 尺寸有限，要实现小尺寸高分辨率显示是非常困难的。但是其不受组装数量的限制，适合于大型、户外显示，如图 1.19 所示。



图 1.19 发光二极管样式和发光二极管显示

随着彩色显示所需的三基色红、绿、蓝，以及橙、黄多种颜色 LED 的发光亮度和效率的提高，如超高亮度的 AlGaInP LED 和蓝色 InGaN LED 的大量投产，LED 显示可以实现超高亮度、全色化显示。由此，LED 显示已从单色显示发展到全彩色显示，从室内显示发展到户外显示，从低密度信息显示发展到高密度信息显示，进入到一个快速发展的时期。

LED 显示的优点是：①主动发光，发光强度大(1～10cd)；②工作电压低，2～3V，工作稳定，工作温度范围宽，寿命长，可达十万小时；③响应速度快；④LED 全彩屏是大屏幕显示(100～200 英寸)的主要方式，是超大屏幕(≥200 英寸)显示的唯一方式。

LED 显示的缺点是：电流大、功耗大，如七段式显示中，每段要 10mA，由 100 个 LED 组成的矩阵显示，全屏发光，工作电流达 1A。



小知识：发光二极管

发光二极管是一种电流注入型半导体 pn 结的发光器件。不同的半导体材料和不同的掺杂可以发出不同颜色的可见光。衬底为半导体晶体材料，通过外延生长技术、扩散技术等制造工艺，制作出许多个小芯片，经过划片分解后，制成一个个小芯片的发光二极管。

1.3 显示器件的性能对比

直式型显示器种类很多，各有特点，应用领域也不一样，见表 1-1。CRT 几乎所有主要性能都比较优异，但缺点是不能把画面尺寸做得很大，体积大、重量重。LCD 的性能近年来各方面都非常好。LED 是以集成发光二极管芯片作为显示画面的，不适合室内

用的高清晰度信息显示，但是将 LED 单元排列并集成可以使之适应室外大型显示的场合，性能也有较大幅度的改进。PDP 在明亮的场所中的对比度差、功耗大，画面尺寸可以做得很大。VFD 是很早作为简单平板显示器得到应用的，在彩色化方面一直没有太大的进展。EL 作为一种非常有前途的显示技术，显示器的性能较好。FED 在理论上同时具有 CRT 和 LCD 的优点，但一般只能应用在小屏幕显示器件上，要制备大屏幕的 FED，生产成本非常高。

表 1－1　各种显示技术特性的比较

特性＼类型	CRT	LCD	OLED	LED	PDP	VFD	EL	FED
工作电压	×	◎	◎	◎	×	△	◎	◎
发光亮度	○	○	◎	△	△	○	◎	◎
发光效率	○	○	◎	◎	△	○	○	◎
器件寿命	◎	○	○	◎	△	△	◎	○
器件重量	×	◎	◎	△	○	△	◎	◎
器件厚度	×	◎	◎	△	○	△	◎	◎
响应时间	◎	△	◎	◎	○	○	◎	◎
视角	◎	△	◎	×	△	○	○	◎
色彩	◎	○	◎	△	○	○	◎	◎
生产性	○	○	○	○	△	△	×	△
成本	◎	○	○	○	×	△	△	×

◎：非常好；○：好；△：普通；×：需要改善。

消费市场所追求的是价廉物美、性能良好的显示器。目前，在市场上批量生产的各类电子显示器在不同领域占有各自的地位。其中 LCD 在性能方面已具有全方面的优势，已凌驾于 CRT 之上，是当前最主要的产品，应用面最广，产量和产值也最高，占领了广泛的消费市场。其他显示也占小部分市场，见表 1－2。

表 1－2　各种显示技术的应用

特性＼类型	CRT	LCD	OLED	LED	PDP	VFD	EL	FED
电视	◎	◎	○		○		○	○
壁挂电视		◎	○		◎		○	
投影显示器	◎	◎						
AV 机监视器	○	◎	◎					
车载机	○	◎	◎			○	△	△
机器显示器		◎	◎	◎		◎	△	○

续表

类型 特性	CRT	LCD	OLED	LED	PDP	VFD	EL	FED
台式个人计算机	○	◎	○		△		○	
笔记本计算机		◎	◎				○	△
手机		◎	◎				◎	◎
便携式信息终端		◎	◎				○	○
计算器、钟表		◎	◎	○		○		
游戏机	◎	◎	○					
测试仪器	○	◎	◎	○	○	○	○	○
公众用显示设备	○	○	◎	◎	○	◎	◎	

◎：非常好；○：好；△：普通；空格表示不宜使用。

1.4　显示器的性能参数

显示器的性能参数决定着显示画面的质量，了解和掌握这些参数的定义和意义是十分必要的。本节重点介绍几种常用的性能参数和基本术语。

1.4.1　响应时间

响应时间是显示器对输入信号的反应时间，如像素由暗转到亮，再由亮转到暗的图像完全显示所用的时间。余辉时间是显示器切断信号到图像完全消失所用的时间。显示器的响应时间和余辉时间越短越好，有利于图像画面的快速切换，在显示快速动作的画面时也不会出现拖尾现象。



小知识：拖尾现象

拖尾是显示器在显示动态图像时出现的边缘模糊、看不清细节的现象，如图 1.20 所示。拖尾现象会造成图像清晰度下降，使人视觉疲劳等。



(a) 清晰



(b) 拖尾

图 1.20　清晰及拖尾画面(www.yesky.com)



1. 主动发光型显示器的响应时间

在CRT显示中，电子束打到荧光粉就会立即发光，余辉残留的时间很短，响应时间非常快。传统的CRT响应时间为1～3ms，最好的CRT响应时间可以达到微秒级。主动发光型显示器的响应时间很容易到达0.1ms。

2. 液晶显示器的响应时间

液晶显示器的显示是依靠液晶分子控制光的透过和阻断的，而液晶分子的转动速度决定了液晶显示器的响应时间，显然要慢得多。早期响应时间为25ms到16ms，最近刚出现了12ms。25ms每秒钟显示1/0.025＝40帧画面，16ms每秒钟显示1/0.016＝63帧画面，12ms每秒钟可以显示83帧画面。目前液晶显示器的响应时间已经能够满足视频显示的要求。

在液晶显示器上施加方波电压后，透过率会发生相应变化，如图1.21所示。对常白模式液晶显示器来说，加电压液晶分子开始旋转，透过率从初始态90%变化到10%所需要的时间为下降时间；电压撤销后，液晶分子依靠分子间的相互作用及表面分子的作用自由恢复，透过率由10%变化到90%所需要的时间为上升时间。但实际上响应时间还包括电压转变瞬间的延迟时间，上升时间和下降时间都要包括延迟时间。液晶器件的响应时间由包括延迟时间的上升时间和下降时间组成。

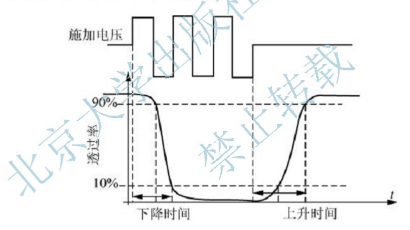


图1.21　常白模式液晶显示器的响应时间

1.4.2　亮度

亮度是指在单位面积上显示器画面的明亮程度，用通过画面法线方向光量的密度表示，单位是坎德拉/平方米(cd/m^2)或尼特(nit)，1nit＝1cd/m^2。

1. 亮度的基本要求

人眼能感觉到的最低亮度为0.03cd/m^2，最大亮度是阳光直射雪地的亮度50000cd/m^2。不同的场合对显示器亮度的基本要求不同。

(1) 暗室内使用，显示器的亮度在40cd/m^{2}左右会感觉很亮。

(2) 白天室内使用，显示器的亮度应在70cd/m^{2}以上。

(3) 白天室外使用，显示器的亮度要达到300cd/m^2。



2. 液晶显示器的亮度

液晶显示器件是被动发光显示器，由背光源发出的光经过偏振片和液晶屏对光进行调制而形成图像的显示器件。亮度取决于光通过液晶屏的透过率和背光源的亮度。液晶屏的透过率是由液晶屏基板及像素的图形、彩膜的透过率等因素决定的，如图 1.22 所示。

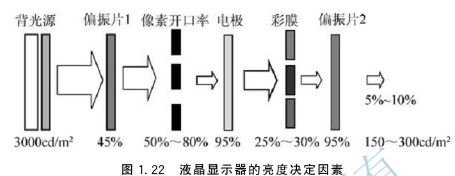
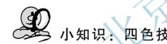


图 1.22　液晶显示器的亮度决定因素

因此，液晶显示器的亮度可以表示为：

$$L_{LCD}=L_{BLU}\cdot T_{LCD}=L_{BLU}\cdot\eta_{p1}\cdot\eta_{AR}\cdot\eta_{ITO}\cdot\eta_{CF}\cdot\eta_{P2} \tag{1.1}$$

式中，L_{BLU}是背光源的亮度；T_{LCD}是液晶屏的透过率，由构成液晶屏部件的透过率决定。其中 η_{p1}是偏振片 1 的透过率，η_{AR}是液晶屏的开口率，η_{CF}是彩膜的透过率，η_{ITO}是电极的透过率，η_{p2}是偏振片 2 的透过率。由此计算液晶屏的透过率大约为 5%～10%左右(对于 TN 模式的液晶显示屏)。根据背光源的亮度计算显示器的亮度，如一个 3000cd/m² 大约可以得到的显示屏亮度为 150～300cd/m²。同样也可以从用户对显示屏亮度的要求推算出所需要的背光源亮度。因此要增加液晶显示屏的亮度除了增加背光源的亮度以外，还可以通过改善液晶屏的开口率、偏振片透过率、彩膜的透过率等实现。最近人们提出了在 RGB 三基色基础上增加白色像素的四色技术增加液晶屏透过率的方法。


小知识：四色技术

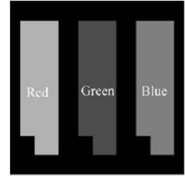
四色技术就是在固有的红、绿、蓝三基色的基础上增加一色，使显示器的亮度和色彩更加明亮和艳丽的技术。如增加黄色像素的红、绿、蓝、黄(RGBY)，还有增加白色像素的红、绿、蓝、白(RGBW)的四色技术，展现了更广阔的色域，使色彩更加绚丽。

1.4.3　开口率

平板显示中，一个非常重要的参数是开口率。在有源矩阵显示中，如 AMLCD 和 AMOLED，每一个子像素都有一个单独的开关器件，用电开关器件控制光开关来实现高分辨率的显示。开关器件必然占用了一定的像素面积，导致实际显示面积缩小，如图 1.23 所示。一般显示器的开口率为 55%左右，超大开口率可达到 80%以上。

1. 开口率定义

开口率是像素的有效透光区面积与像素总面积的比值，如图 1.24 所示。开口率受阵列基板上 TFT 的大小、栅线、信号线、存储电容宽度，以及阵列基板与彩膜基板对位精读的制约。开口率越大，液晶显示器的光学利用率越高，显示器的亮度也会越高。



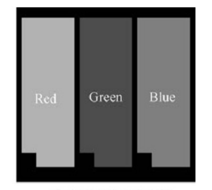


图 1.23　不同开口率的显示器

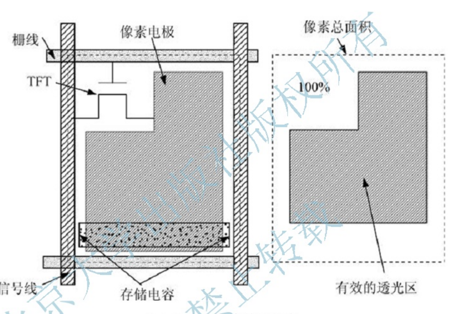


图 1.24　亚像素的开口率

2. 提高开口率的技术

通过改变设计方案和工艺能力，缩小栅线、信号线宽度和 TFT 等大小可以提高开口率，但是提高程度有限。另外，通过改变线间距提高开口率的措施也是非常有效的，常用的有两种，一种是 BM on Array 设计，另一种是有机膜绝缘层设计。

BM on Array 设计就是把黑矩阵(Black Matrix，BM)制作在阵列基板(Array)上的一种方法。通常的设计如图 1.25(a)所示，黑矩阵制作在彩膜基板上，起到遮光的作用，TFT、信号线、线间距部分都要被黑矩阵遮挡住。但是在阵列基板和彩膜基板对盒过程中，为保证黑矩阵能够遮挡住信号线及线间距，黑矩阵需要在像素电极上有一定交叠，交叠区宽度一般为 4～5μm，开口率比较小。而 BM on Array 的设计如图 1.25(b)所示，阵列基板在制作薄膜晶体管阵列之前，先制作一层黑矩阵，光刻出黑矩阵图形正好可以遮挡住线间距，接着沉积一层隔离层，再按照正常工艺制作薄膜晶体管阵列。因为线间距被阵列基板上的黑矩阵遮挡住了，阵列基板和彩膜基板对盒时在像素电极上不用再交叠，开口率明显提高。

有机膜绝缘层设计利用高介电常数的有机膜材料作为绝缘层，使得信号线和像素电极

ITO层制作在不同层内。通常的设计如图1.25(a)所示，信号线和像素电极在同一平面，两者之间为避免短路，要刻蚀出来一定宽度的线间距。在阵列基板和彩膜基板对盒时，为保证黑矩阵能够遮挡住信号线及线间距，需要在像素电极上有一定交叠。而有机膜绝缘层设计如图1.25(c)所示，阵列基板上信号线制作完成后，沉积一层有机绝缘层，然后在上面再溅射ITO，光刻出像素电极。制作的信号线和像素电极被有机绝缘层隔离开，像素电极可以制作得大些，与信号线在垂直方向出现交叠。黑矩阵变小，开口率明显提高。

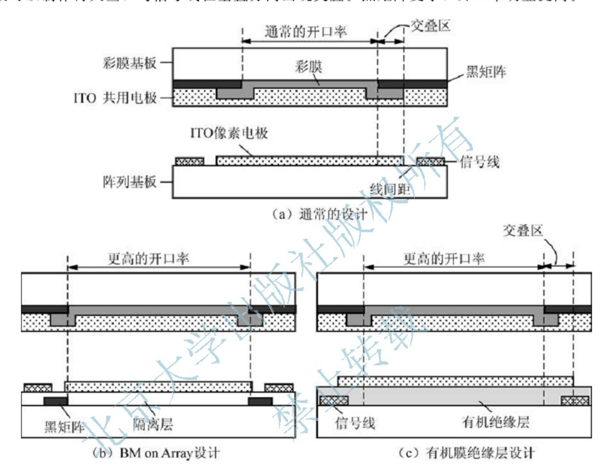


图1.25 通常的设计、BM on Array设计和有机膜绝缘层设计

1.4.4 对比度和灰度

1. 对比度

对比度(Contrast Ratio，CR)是指显示器的最大亮度与最小亮度的比值。对比度表示为：

$$CR=\frac{L_{\max}}{L_{\min}} \quad 或者 \quad CR=\frac{L_{\max}+L_{b}}{L_{\min}+L_{b}} \tag{1.2}$$

式中，$L_{\max}$和$L_{\min}$分别表示最大亮度和最小亮度；L_{b}表示环境光照射到显示器上产生的亮度。

2. 灰度

灰度是指在白和黑之间的亮度层次分成几个等级，表示显示亮度不同的反差。灰度用

灰度级表示，彩色显示用颜色数表示。显示器的灰度级数越多，图像层次越分明，图像也越柔和，人眼可以获得较佳的图像，灰度级为 8 级的显示如图 1.26 所示。



图 1.26 灰度级 8 级的显示

以液晶显示为例说明灰度的实现方法。在光电特性曲线上，加电压 $V_1 \sim V_3$ 3 个信号会获得不同的透过率。透过率的最高点为 100%，电压 V_1 的透过率为 90% 以上，电压 V_2 透过率为 50%，电压 V_3 透过率为 10% 以下，3 个电压对应的画面亮度分别是白、灰、黑，如图 1.27 所示。

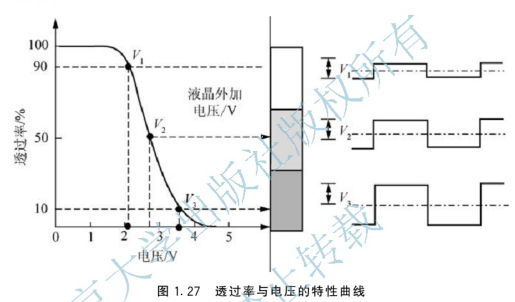


图 1.27 透过率与电压的特性曲线

如果在最高和最低电压间加多个不同的电压，就会形成多个亮度不同的灰度级，电压与数据信号位数(比特数，bit)相对应。灰度级和颜色数表示为：

$$灰度级数 = 2^{数据比特数} \quad (1.3)$$

$$颜色数 = 灰度级^3 \quad (1.4)$$

灰度级数为 2 的数据比特数次方。彩色显示的颜色数为灰度级数的 3 次方，对应关系见表 1-3。如用“0”和“1”组合成 3 位数据，数据信号为 3 比特，可显示的灰度级数为 $2^3=8$ 级。彩色显示时可显示的颜色数是 $8^3=512$ 色。当数据信号为 6 比特时，可显示的灰度级数为 $2^6=64$ 级，可显示的颜色数为 $64^3=26$ 万色。

表 1-3 数据比特数、灰度级数和显示颜色数间的关系

数据比特数	灰度级数	显示颜色数
3	8	512
4	16	4096
5	32	32000
6	64	26 万

续表

数据比特数	灰度级数	显示颜色数
7	128	200 万
8	256	1670 万
9	512	134 万
10	1024	1074 万

1.4.5 分辨率及画面尺寸

分辨率是显示器能够分辨出图像最小细节的能力。CRT 显示的分辨率用每帧画面的扫描行数表示，如 525、625、1024 等。平板显示的分辨率用屏幕上纵横排列点的总数来表示。

1. 像素

平板显示由很多纵横排列的点构成了画面显示的图像，最小单位的点称为像素。分辨率常表示扫描线数与信号线数的积，相当于是一个屏幕的像素数。如 VGA 的分辨率为 640×480，大约 31 万个像素。在彩色显示中，一个像素又分为红(R)、绿(G)、蓝(B)三色，每个 R、G、B 的点称为子像素或者亚像素。

根据在一个画面上像素排列的多少，名称也不一样，见表 1-4。有源矩阵显示中，组成 TFT 的数与像素数相同。如 VGA 像素数约为 31 万像素，在黑白显示中，大约 31 万个薄膜晶体管。在彩色显示中，大约有 100 万个晶体管(子像素数约 100 万个像素)。分辨率越高，像素数越多，包含的细节越多，图像越清晰。全高清电视(FHD)扫描线和信号线都大于 1000。

表 1-4 液晶显示器的图像表示规格

表示规格名称	缩写	分辨率	长宽比
Quarter Common Intermediate Format	QCIF	176×144	11∶9
Quarter Common Intermediate Format Plus	QCIF+	176×220	11∶9
Quarter Video Graphics Array	QVGA	320×240	4∶3
Color Graphics Adapter	CGA	320×200	16∶10
Enhanced Graphics Adapter	EGA	640×350	64∶35
Video Graphics Array	VGA	640×480	4∶3
Super Video Graphics Array	SVGA	800×600	4∶3
eXtended Graphics Array	XGA	1024×768	4∶3
Engineering Work Station	EWS	1152×900	32∶25
Super eXtended Graphics Array	SXGA	1280×1024	5∶4
Ultra eXtended Graphics Array	UXGA	1600×1200	4∶3
Full High Definition TV	FHD	1920×1080	16∶9
Quadrable eXtended Graphics Array	QXGA	2048×1536	4∶3

2. PPI

分辨率除了用像素数表示外，也用 ppi 表示。ppi(Pixels per inch)是每英寸所拥有的像素(Pixel)数目。ppi 数值越高，显示图像的密度越高，画面的细节越丰富。ppi 为：

$$\text{ppi}=\frac{\sqrt{\text{行数}^2+\text{列数}^2}}{\text{画面尺寸(英寸)}} \tag{1.5}$$

例如：苹果的 iphone4 屏幕为 3.5 英寸，分辨率为 960×640，约 330ppi，即屏幕的像素密度达到 330 像素/英寸。索爱 X1 的屏幕为 3.0 英寸，分辨率为 800×480，约 311ppi。通常大家用的电脑显示器屏幕的分辨率为 72ppi，人眼能分辨 ppi 的极限为 300ppi。苹果的 iphone4 超过人眼能分辨的极限，堪称为超高像素密度的液晶屏。

3. 长宽比和画面尺寸

长宽比是显示画面横方向尺寸和纵方向尺寸的比。通常电视画面和几乎大部分大画面显示器的长宽比为 4∶3，高清晰度电视画面为 16∶9。

画面尺寸是指显示区域对角线的长度。如 10.4″是指显示屏的显示区对角线长度为 10.4 英寸，1 英寸＝2.54cm，用厘米表示为 26cm 显示屏幕。

4. 像素间距

像素间距是像素到像素的重复距离，就是单元像素的大小。由分辨率和画面尺寸可以计算出像素间距。

$$\text{横向的像素间距}=m\times 2.54\times\frac{c}{\sqrt{c^2+d^2}}\div\text{横向像素数} \tag{1.6}$$

$$\text{纵向的像素间距}=m\times 2.54\times\frac{d}{\sqrt{c^2+d^2}}\div\text{纵向像素数} \tag{1.7}$$

式中，m 为画面尺寸，单位为英寸，c 和 d 为长、宽数值，长宽比用 $c:d$ 表示。例如，一个 10.4″的 VGA(640×480 像素)长宽比为 4∶3，计算得到的显示屏的像素间距大约为 330μm。即：

横向：(10.4×2.54×0.8)÷ 640 ＝ 0.03302 cm≈330μm

纵向：(10.4×2.54×0.6)÷ 480 ＝ 0.03302 cm≈330μm

显示屏分辨率越高(像素数越多)，像素间距越小。人眼就越难分辨出单个像素点，图像画面越连续光滑。显示文字或字符，像素间距通常要小于 300μm；显示图像，像素间距最好要小于 200μm。

1.4.6 发光效率及工作电压

1. 显示色

显示色是指主动发光型显示器所发出的光的颜色，以及被动发光型显示器所透射或发射的光的颜色。图像显示色主要有黑白和全彩色。CRT、LCD、OLED 等都能够显示色彩逼真的全彩色图像。

2. 发光效率

发光效率是主动发光显示器主要的参数，等于所发出的光通量与显示器所消耗的功率

之比，单位为 lm/W。OLED 的发光效率可达到 15 lm/W，VFD 可达到 10 lm/W，PDP 可达到 1 lm/W。液晶显示器的发光效率由背光源的效率决定。

发光效率决定了显示器工作时的功率消耗。如电视市场，42 英寸的 AC PDP 消耗功率为 450W，LCD 的消耗功率不到 200W。

3. 工作电压

驱动显示器所加的电压为工作电压。显示器工作时流过的电流为消耗电流。工作电压与消耗电流的乘积为功率消耗。工作电压有直流和交流两种，LCD 需要交流工作电压，LED 和 OLED 需要直流工作电压，PDP 两种都有。

LCD、LED、OLED、VFD 工作电压较低，可用集成电路驱动，成本低。PDP 的工作电压高，驱动电路成本很高。LCD 的消耗电流最低，每平方厘米只有微安的量级。

1.4.7 产线世代

平板显示中，如液晶显示器，玻璃基板的大型化是提高生产能力的方法。基板尺寸的大小决定了生产线使用的设备型号，决定着产线世代。第一代生产线玻璃基板尺寸是 300mm×400mm，可切割 10.4″显示屏 2 块。第二代生产线玻璃基板是 360mm×465mm，可切割 10.4″显示屏 4 块，生产能力提高到 2 倍。一张玻璃基板能切割成芯片的数量称为集成度。产线世代提高，集成度提高，成本降低。中国大陆液晶面板生产线框架见表 1－5。

表 1－5 中国大陆液晶面板生产线框架(www.FPDisplay.com)

厂商	厂址	玻璃基板尺寸 /mm×mm	产线时代	月产能/k	投产状况	备注
信利	汕尾	400×500	2.5	50	量产	2007 年 Q4 投产
龙腾光电	昆山	1100×1300	5	110	量产	2006 年 Q3 投产
深超光电	深圳	1200×1300	5.5	100	量产	2009 年 Q1 投产
莱宝高科	深圳	400×500	2.5	30	量产	2008 年 Q3 投产
天亿科技	成都	1500×1800	6	60	待定	2013 年 Q4 投产
中电熊猫	南京	1500×1800	6	80	量产	2011 年 Q2 投产
深天马	上海	1100×1300	5	92	量产	深天马托管
		730×920	4.5	30	量产	2007 年 Q4 投产
	成都	730×920	4.5	30	量产	2010 年 Q2 投产
	武汉	730×920	4.5	30	量产	2012 年 Q4 投产
	厦门	1200×1300	5.5	30	量产	待定
京东方	成都	730×920	4.5	30	量产	2009 年 Q3 投产
	北京	1100×1300	5	97	量产	2005 年 Q1 投产
	合肥	1500×1800	6	90	量产	2010 年 Q4 投产
	北京	2200×2500	8.5	90	量产	2011 年 Q3 投产

续表

厂商	厂址	玻璃基板尺寸/mm×mm	产线时代	月产能/k	投产状况	备注
华星光电	深圳	2200×2500	8.5	100	量产	2011 年 Q4 投产
三星	苏州	1870×2200	7.5	100	已开工	待定
LGD	广州	2160×2400	8	120	已开工	待定
友达光电	昆山	2160×2400	8	90	延期	待定
熊猫液晶	南京	3000×3000	10	60～90	待定	待定

本 章 小 结

显示技术是人机联系和信息展示的窗口，是信息时代的一个重要环节，在人类知识的获得和生活质量的改善方面扮演着重要的角色，广泛应用于娱乐、工业、军事、交通、教育、航空航天，以及医疗等社会的各个领域。



1. 显示技术的发展

显示技术的发展可以划分为 3 个时代。第一代显示是阴极射线管显示器(CRT)，已接近时代的尾声，渐渐退出了历史的舞台。第二代显示是液晶显示器(LCD)，在当今时代锋芒毕露，成为平板显示领域的主流。第三代显示是有机发光显示器(OLED)，在当今时代中崭露头角，被业界人士认为是最有前景的新一代显示器。未来的显示是那种薄如纸可以随意折叠的显示器，更让人渴望。

2. 显示器的种类

按显示器显示图像的方式分，有投影型、空间成像型和直视型 3 种。其中直视型显示器是人们生活中随处可见的，又分为很多种。按显示器的形态分，有阴极射线管显示器和



平板显示器两种。按发光方式分，有主动发光型和非主动发光型两种。按是否含有有源器件分，有无源矩阵和有源矩阵两种。

3. 显示器的性能参数

显示器的性能参数决定着显示画面的质量，了解和掌握这些参数的定义和意义是十分必要的。

本 章 习 题

一、填空题

1. 显示器的分类方法有多种，按显示器显示图像的方式分有____________、____________和直视型；按显示器的形态分为____________和____________。

2. 按照发光方式分有____________和____________。

3. 投影型显示器根据使用的图像源不同，分为____________、____________、DLP投影技术。DLP投影技术是____________，将____________作为反射镜，将图像投影到屏幕上的一种投影显示。

4. CRT显示器是____________显示器，利用____________轰击荧光粉实现显示，主要由____________、偏转线圈、____________、____________和圆锥形玻壳等部分组成。

5. PDP是____________显示器，利用____________激发荧光粉实现显示。

6. LCOS是Liquid Crystal On Silicon的缩写，是____________显示。与一般的TFT LCD面板不同的是，LCOS面板的上基板是____________，下基板是____________。

7. 空间成像型显示器是空间虚拟图像，代表技术有____________和____________。

8. VFD是____________显示器，利用____________进行显示的技术，是一种主动发光型平板显示器。

9. 常说的LED显示是指采用____________的显示器。

10. 第一代液晶显示器的基板尺寸是____________，可切割10.4″显示屏____________块。

二、名词解释

主动发光显示、被动发光显示、投影型显示、空间成像显示、电致发光显示、场致发射显示、发光二极管显示、响应时间、亮度、开口率、对比度、灰度、拖尾、像素、ppi、画面尺寸、长宽比、像素间距、发光效率、工作电压、产线世代

三、简答题

1. 简述CRT显示的原理。
2. 简述PDP显示的面板结构。
3. 简述场致发射的结构及原理。
4. 简述FED和CRT的区别。
5. 简述热电子发射和冷发射的区别。
6. 简述真空荧光显示的结构和原理。

7. 简述液晶显示器亮度的决定因素有哪些，并计算分析实际亮度能达到多少。

8. 简述灰度级和颜色数的关系，并举例说明。

9. 简述柔性显示面临的技术瓶颈。

四、思考题

1. 思考PDP显示面临的问题，适合应用在哪些领域？

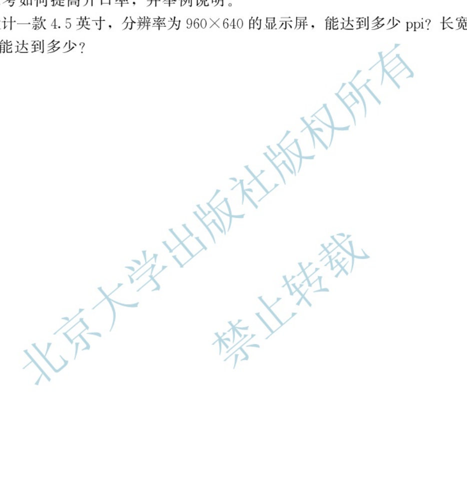
2. 以三片式液晶面板投影机说明透射式投影原理。

3. 分析VFD的局限性及发展。

4. 在一个演出的场合需要使用200英寸以上的显示器应选择哪种显示器？为什么？

5. 思考如何提高开口率，并举例说明。

6. 设计一款4.5英寸，分辨率为960×640的显示屏，能达到多少ppi？长宽比为4∶3时，像素间距能达到多少？



第2章

液晶显示器基础

近年，液晶显示技术发展迅猛，几乎渗透到人们日常生活和生产中的每一个角落，如手机、计算机、电视机、各种数码设备及各种生产中的显示设备和公共显示设备等，是人们获取信息的重要方式之一，是当今时代的主流显示。那么，到底什么是液晶材料？有什么性质和特点呢？又是如何实现显示的呢？带着这些问题，开始本章的学习。



教学目标

- 了解液晶材料的特点及种类；
- 了解液晶材料的物理性质；
- 掌握液晶显示器的电光效应；
- 掌握液晶显示器的显示原理。



教学要求

知识要点	能力要求	相关知识
液晶的种类	（1）掌握液晶的定义及特点 （2）了解液晶材料的种类 （3）了解液晶材料的应用	固态和液态的性质
液晶的物理性质	（1）了解液晶材料各种物理性质的定义 （2）掌握液晶材料物理性质对显示的影响 （3）了解部分液晶材料物理性质之间的关系	液体的流动理论 晶体的光学性质
液晶的电光效应	（1）了解液晶电光效应的种类 （2）掌握各种电光效应的特点 （3）掌握各种电光效应的显示原理	光电子技术基础
液晶显示的显示原理	（1）了解液晶显示器的种类 （2）掌握 TN 型液晶显示的显示原理 （3）掌握 STN 型液晶显示的显示原理	主动发光的显示原理



推荐阅读资料

[1] 高鸿锦，董友梅．液晶与平板显示技术[M]．北京：北京邮电大学出版社，2007.

[2] 应根裕，屠彦，万博泉，等．平板显示应用技术手册[M]．北京：电子工业出版社，2007.



基本概念

液晶：在某个温度范围内，具有晶体的各向异性和液体的流动性，是不同于通常的固态、液态和气态的一种新的物质状态，又称为物质的第四态。

液晶的电光效应：液晶在电场作用下分子的排列状态发生改变，引起液晶屏光学性质变化的一种电场下光调制现象。

2.1　液晶的特点

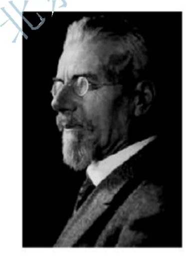
随着大屏幕显示、彩色显示、便携式显示的发展，液晶显示已经成为当前显示技术的主流。液晶显示技术的诞生和发展与液晶材料的发展紧密地联系在一起。联苯氰类液晶材料的发现实现了TN-LCD的工业化生产；含氟液晶材料的出现实现了AM-LCD的产业化。因此，了解和掌握液晶材料及物理性质将加深对液晶显示技术的理解。本节主要介绍液晶的定义及特点。



发现故事：液晶的发现

1888年，奥地利植物学家莱尼茨尔(F. Reinitzer)在研究植物中的胆固醇时，意外地发现异常的溶解现象。这种有机化合物在145℃时溶解呈现浑浊状态，达到179℃时突然变成清亮透明的液体。当温度从高温往下降时，同样在低于179℃时变成浑浊的液体，低于145℃时又变成了固体。更重要的是，两个熔点之间，他观测到了双折射现象和相应的颜色变化。Reinitzer百思不解，于是写信给当时研究相变的权威，著名的德国物理学家O. Lehmann。

1889年，德国物理学家O. Lehmann观察到同样的现象，并用偏光显微镜证实了这种浑浊的液体中间相具有和晶体相似的性质。因此，这种具有晶体的光学各向异性兼具有液体的流动性的物质称为液晶(liquid crystal)。胆甾醇苯甲酸脂是世界上首次发现的热致液晶。两位伟大的科学家如图2.1所示。



(a) Friedrich Reinitzer (1857—1927)

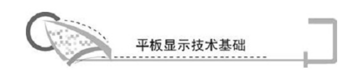


(b) Otto Lehmann (1855—1922)

图2.1　两位伟大的科学家

大自然的一切物质有三态：固体、液体和气体。通常固体加热至熔点变成透明的液体，温度再升高就变成气体。物质由固体向液体的相变是人们熟悉的现象，如冰在0℃开





始转变成水。固体向液体的相变过程中，物质的温度并不升高，吸收的热能用于瓦解晶体的点阵结构。有些有机物晶体在由固体向液体转变的过程中会生成一种介于晶体和液体之间的中间相，称为介晶相。

介晶相有两种状态：一种是塑性晶体，随着温度的升高晶体中分子的点阵结构开始松弛，分子指向可以任意转动，但还保持着在点阵中的位置。这种有机晶体熔化不具有流动性，称为塑性晶体。塑性晶体丧失一部分各向异性，但还保持着晶体的外形。

另一种是液晶，随着温度的升高晶体中分子的点阵结构开始解体，分子的指向保持不变，但分子不在点阵中的位置而是随机地排列。这种有机晶体熔化具有流动性，且像晶体一样呈现各向异性，称为液晶。液晶的对称性比原来晶体有不同程度的削弱。随温度进一步升高，介晶相的塑性晶体和液晶都可以成为真正的、各方向的物理性质都一样的液体。

因此，液晶是在某个温度范围内兼具有液体和晶体二者特性的物质，具有晶体的各向异性所特有的双折射现象，又具有液体的流动性。固态物质加热以后先熔化成为白色状态的黏液，随着温度不断升高又变成清亮透明的液体，转化过程中不仅存在一个熔点，还有一个清亮点。这种介于熔点与清亮点之间的特殊状态不同于通常的固态、液态和气态的一种新的物质状态，又称为物质的第四态或液晶态，是介晶相的一种。液晶状态时美丽的景象如图 2.2 所示，利用处于一定温度范围内的液晶材料可以制成各种液晶显示器。



图 2.2 液晶状态时美丽的景象

2.2 液晶的种类

随着人们对液晶材料的逐渐了解，发现液晶基本上都是有机化合物，每 200 种有机化合物中就有一种具有液晶态。从组成和产生液晶态的物理条件看，液晶可以分为热致液晶和溶致液晶两大类。热致液晶是把某些有机物加热熔解，由于加热破坏晶体的点阵结构而形成的液晶在某一温度范围表现出液晶的性质。溶致液晶是把某些有机物放在一定的溶剂中，由于溶剂破坏晶体的点阵结构而形成的液晶。生活中溶致液晶是非常常见的，如肥皂水就是由于溶液浓度发生变化而出现的液晶相。在生物体系中也存在大量的溶致液晶。但



目前在光电子技术中的显示器件方面用到的液晶材料基本上都是热致液晶。因此，本节主要介绍热致液晶。

热致液晶是某些有机物在某一限定温度范围内的状态。当温度低于熔点温度 T_{mp} 时为晶体；当温度高于清亮点温度 T_{cp} 时为清澈的液体；只有在限定的温度范围内是浑浊的液体，并具有固体的某些光学特性。熔点和清亮点之间的温度范围为热致液晶的温度范围，如图 2.3 所示。热致液晶能从固体加热或从液体冷却而得到，转变过程称为相变。一种相变可逆，从固体加热和从液体冷却都能形成液晶的转变过程称为互变相变型；另一种相变不可逆，只在液体冷却时才能形成液晶称为单变相变型。用于显示的液晶材料都是可以工作于室温的热致液晶，保持各向异性液晶状态的温度范围越宽，应用越广。

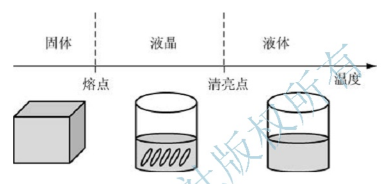
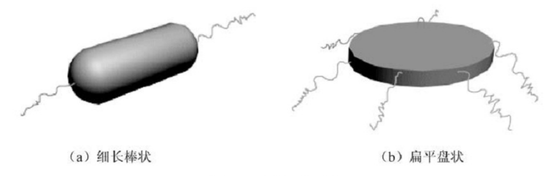


图 2.3　热致液晶的温度范围

2.2.1　液晶相

1. 棒状液晶

典型的液晶分子结构是由刚性中心部分和柔性分子链组成的。按照刚性中心部分的形状可以把液晶分成两种类型：细长棒状和扁平盘状，如图 2.4 所示。用于显示领域的液晶材料主要是细长棒状液晶。细长棒状的液晶分子刚性中心部分是细长条状结构，分子取向与液晶的表面状态和其他分子有关。当外界电场、磁场或温度稍有变化，分子的排列方向也随之变化，分子的运动便会发生紊乱，从而使光学性质发生变化。细长棒状液晶根据液晶相又分为：向列相、近晶相、胆甾相。



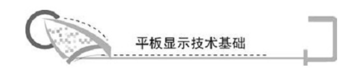
(a) 细长棒状　　(b) 扁平盘状

图 2.4　液晶分子形状

2. 近晶相液晶

近晶相液晶(Smectic)又称为层状液晶，由棒状分子排列成层，层内分子长轴相互平





行，方向垂直于层面或与层面呈倾斜排列，如图 2.5 所示。这种排列的分子层间作用力较弱，相互间容易滑动，呈现出二维流体的性质，黏度高。分子在层内可以前后左右滑动，但不能在上、下层之间移动，具有高度有序性。

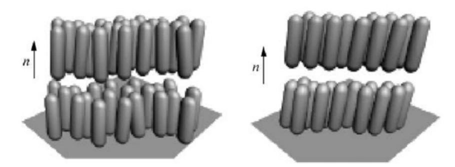


图 2.5 近晶 A 相和近晶 B 相液晶的分子排列

3. 向列相液晶

向列相液晶(Nematic)又称为丝状液晶，由长径比很大的棒状分子组成，如图 2.6 所示。每一分子的位置虽无规则，但分子长轴基本保持平行，不能排列成层状，可以上下、左右、前后滑动，如图 2.7 所示。由于各个分子容易顺着长轴方向自由移动，黏度小，富于流动性。在光学上，由于液晶分子的长轴大体指向一个方向，使向列相液晶具有单轴晶体的光学特性。在电学上，由于具有明显的介电各向异性，在外加电场作用下原有分子的有序指向发生改变，液晶的光学性质也随之改变。向列相液晶具有明显的电学、光学各向异性，加上黏度较小，成为液晶显示器中应用最为广泛的一类液晶。

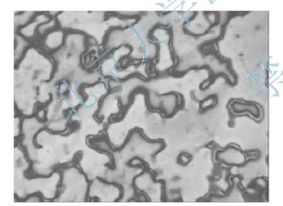
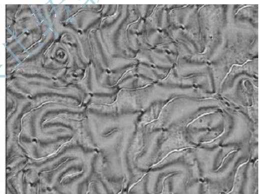



图 2.6 向列相液晶的线状结构

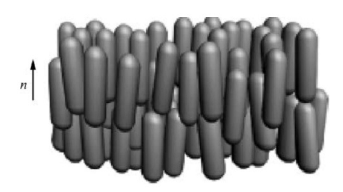


图 2.7 向列相液晶的分子排列

当温度降低时，许多向列相液晶会相变到另一有序度稍高的液晶态——近晶 B 相；有些材料也可能直接从各向同性的液体转变为近晶相。图 2.8 描述了这几种相互转变的过程。

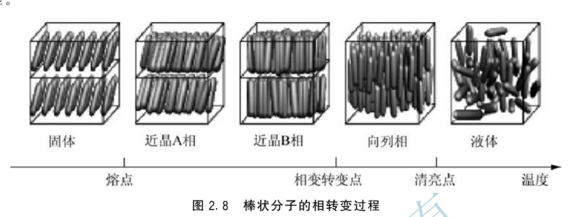


图 2.8　棒状分子的相转变过程

4. 胆甾相液晶

胆甾相液晶(Cholesteric)又称为螺旋型液晶，具有层状结构，层内分子平行排列，且平行于层面，如图 2.9 所示。实际上，胆甾相是向列相的一种畸变，层内的分子长轴彼此平行，与相邻层的分子取向都有偏移，层层叠起来，整体排列呈现螺旋结构。当不同层的分子长轴排列沿螺旋方向的变化后，又回到初始取向为一周期，周期内的层间距为胆甾相液晶的螺距，长度为可见光波长量级。胆甾相液晶具有旋光性、选择性、光散射性和偏振光二色性、负单轴晶体的双折射性。

胆甾相液晶和向列相液晶可以互相转换。在向列相液晶中加入旋光物质会转变成胆甾相液晶；在胆甾相液晶中加入消旋向列相液晶又能将胆甾相液晶转变为向列相液晶。

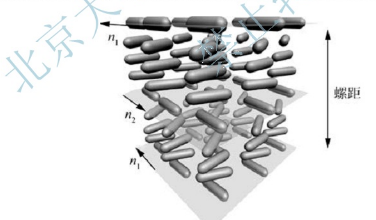
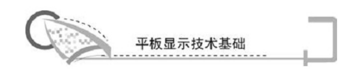


图 2.9　胆甾相液晶分子的排列

2.2.2　液晶的应用

目前，各种类型的液晶材料基本都用于开发液晶显示器。如向列相液晶显示器、聚合物分散液晶显示器、双(多)稳态液晶显示器、铁电液晶显示器和反铁电液晶显示器等。在多种液晶显示器中，开发最成功、市场占有量最大、发展最快的是向列相液晶显示器。在本章后面将详细介绍向列相液晶显示器，本节主要介绍几种其他液晶的应用。



1. 近晶相液晶的应用

近晶相液晶可以用于显示或光学存储。近晶相液晶中有一种不施加电压也会极化的自发极化型液晶，分子方向统一、层结构，如“铁电液晶”(Ferroelectric Liquid Crystal，FLC)及“反铁电液晶”(Anti Ferroelectric Liquid Crystal，AFLC)。

在1992年，英国EMI中心宣布发明了一种新的液晶显示技术——铁电液晶显示器(Ferroelectric LCDs，FLCD)。铁电液晶显示器是近晶相液晶最主要的应用。与目前主流的向列相液晶显示器相比，特点是：①响应速度快，可达微妙级；②高存储性，不改电压也可以保持当前显示的状态，更省电，对笔记本计算机、PDA等便携设备是非常有意义的；③宽视角，已达到现代高分辨率彩色电视的要求。缺点是：①铁电液晶显示器在制作中必须严格控制铁电液晶基板的间隔才能获得光学均匀性；②基板表面需特殊的处理才能保证分子层整齐排列；③对振动非常敏感。因此，在很大程度上限制了铁电液晶的应用。



铁电液晶的柔性液晶显示器

日本放送技术研究所NHK采用分辨率为96×64的有机TFT有源矩阵基板，结合基于LED侧照光的场序背光源，实现了彩色显示。在两枚柔性基板之间形成树脂壁，充入铁电液晶和紫外线硬化树脂的混合溶液，提高整体温度，并进行图案掩膜紫外曝光，避免了在树脂壁附近产生液晶分子取向紊乱的现象，提高了对比度。制成的铁电液晶柔性液晶显示器在弯曲半径约2cm下同样能够完好地显示，如图2.10所示。



图2.10　使用了铁电液晶的柔性液晶显示器(www.dvbcn.com)

2. 胆甾相液晶的应用

1888年F. Reinitzer等首次发现的液晶就是胆甾相液晶。胆甾相液晶主要应用在显示中，如聚合物网络稳定液晶显示器和多稳态液晶显示器。原理是利用调配好的胆甾相液晶，温度改变时螺距依次进入可见光区，人们便可以观察到布拉格反射光。

目前，人们正在为实现电子书等省电型显示器不断推进和发展胆甾相液晶。不施加电压可对特定的光反射的状态(水平螺旋取向)，施加电压后可对光通过的状态(垂直螺旋取向)，两种状态均为“双稳态”，切断电压也会持续保存显示内容。

引例：电子纸技术最终将收敛于胆甾相液晶

韩国三星电子LCD研发中心业务副总裁Sung Tae Shin在“FPD International 2009 Forum”的电子纸会议上介绍胆甾相液晶在彩色显示和视频显示的性能上表现出色，并对电子纸技术的发展前景发表观点，认为“电子纸技术最终将收敛于胆甾相液晶”。

三星电子展出了支持视频格式的10.7英寸电子纸，采用了胆甾相液晶，如图2.11所示。其具有照片模式及视频模式两种显示模式，两模式间可自由切换。照片模式下，与普通电子纸一样，只改写显示内容时不会消耗电量。视频模式下，显示内容时会消耗电量。



图2.11 三星公司采用胆甾相液晶的电子纸(dh.yesky.com)

2.3 液晶的物理性质

液晶是由棒状、盘状等分子组成的部分有序的物质。不同于分子排列完全混乱的各向同性的液体，也有别于分子排列完全有序的晶体。介于晶体与液体之间的分子排列，以及分子本身的特殊形状与性质，导致了液晶呈现出液体与晶体的双重特性。本节将介绍与分子结构密切相关的液晶的物理性质，这直接影响显示器的各种性能参数，如图2.12所示。

2.3.1 介电各向异性

液晶介电各向异性是指液晶在不同方向上的介电常数不同，是决定液晶分子受电场影响程度的主要参数。常用$\Delta\varepsilon$表示，$\Delta\varepsilon=\varepsilon_{/\!/}-\varepsilon_{\perp}$。其中$\varepsilon_{/\!/}$和$\varepsilon_{\perp}$分别表示平行和垂直于分子长轴方向的介电常数，表示在电场作用下介质极化的程度，如图2.13所示。根据$\Delta\varepsilon$的符号可以把液晶分为正性液晶和负性液晶。在未施加电场，$E=0$时，液晶屏内的液晶分子按照一定方向排列，如图2.14(a)所示；正性液晶用N_p表示，具有$\varepsilon_{/\!/}>\varepsilon_{\perp}$，$\Delta\varepsilon>0$，在外电场作用下，液晶分子的长轴方向$n$与外场$E$平行时体系的能量最小，图2.14(b)所示；负性液晶用N_n表示，具有$\varepsilon_{/\!/}<\varepsilon_{\perp}$，$\Delta\varepsilon<0$，在外电场作用下，液晶分子长轴方向$n$与外电场$E$垂直时体系的能量最小，如图2.14(c)所示。



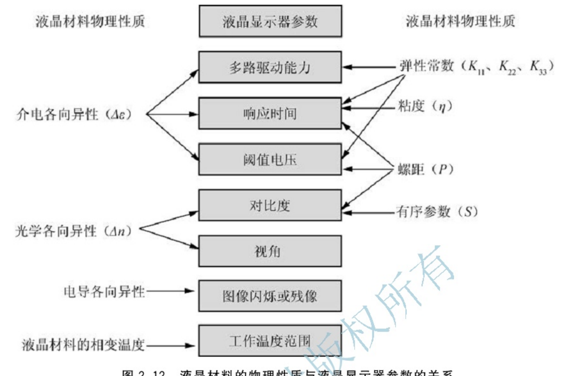


图 2.12　液晶材料的物理性质与液晶显示器参数的关系

图 2.13　液晶分子的介电常数

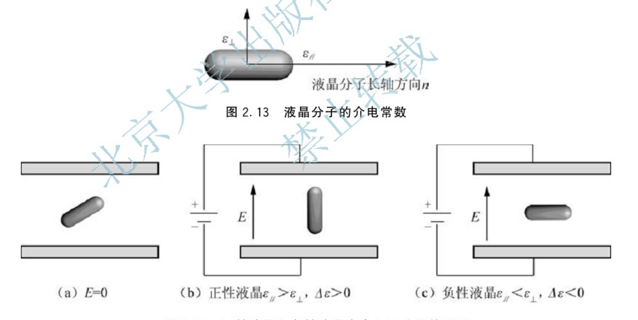


图 2.14　正性液晶和负性液晶在电场下分子的排列

扭曲排列时液晶显示器的阈值电压取决于：

$$V_{TH}=\pi\sqrt{\frac{K_{11}+\dfrac{K_{33}-2K_{22}}{4}}{|\Delta\varepsilon\cdot\varepsilon_0|}} \tag{2.1}$$

其中 K_{11}、K_{22}、K_{33}是液晶的弹性常数，后面将做详细介绍。ε_0是真空介电常数。由式(2.1)可以看出，阈值电压 V_{TH}与介电各向异性的开根号成反比，增加 $\Delta\varepsilon$ 可以降低阈值电压。

2.3.2 光学各向异性

1. 液晶的双折射性

液晶除了在不同方向上的介电常数不同外，在不同方向上的折射率也不同，具有光学各向异性。当自然光在液晶中传播时，除反射光线外，一般还有两条折射线，这种现象称为液晶的双折射性，如图 2.15 所示。一条折射线为寻常光，用符号 o 表示(Ordinary)。寻常光总是遵循折射定律，无论入射光束的方位如何总在入射面内，折射率为常数；另一条折射线为非寻常光，用符号 e 表示(Extraordinary)。非寻常光与入射光不在同一平面内，不遵循折射定律，即使入射角为零，相对折射率也不为零。

非寻常光的折射率为 n_e，寻常光的折射率为 n_o，用 $\Delta n=n_e-n_o$来表示液晶的双折射性。根据液晶的双折射性，可以把液晶分为正光性液晶和负光性液晶。当光经过液晶时，非寻常光的折射率(n_e)大于寻常光的折射率(n_o)，$\Delta n=n_e-n_o>0$，这种液晶材料在光学上称为正光性液晶。相反，非寻常光的折射率小，$\Delta n=n_e-n_o<0$，在光学上称为负光性液晶。向列相液晶几乎都是正光性液晶，$\Delta n>0$，寻常光的折射率小；胆甾相液晶为负光性液晶，$\Delta n<0$，非寻常光的折射率小。

液晶中也存在着一个与晶体同样的特殊方向，当光在液晶中沿着这个方向传播时不发生双折射，这个特殊方向称为光轴。取向一致的向列相液晶、多数近晶相液晶与单轴晶体一样，只有一个光轴方向，光轴同液晶分子长轴方向平行。胆甾相液晶的光轴同螺旋轴平行，而与液晶分子长轴方向垂直。

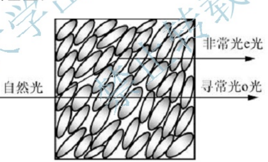
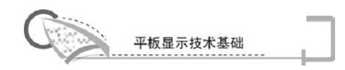


图 2.15 液晶的双折射

2. 光在液晶中不同的偏振方向传播速度不同

光在液晶中传播时，传播速度与折射率有关，而光的偏振方向不同，折射率也不同。光是一种电磁波，电场方向称为光的偏振方向。光在大部分向列相和近晶相液晶中传播时，非寻常光的折射率 n_e大，光的偏振方向与分子长轴方向平行时折射率较大，即 $n_{/\!/}$较大，有 $n_e=n_{/\!/}$；寻常光的折射率 n_o小，光的偏振方向与分子长轴方向垂直时折射率较小，即 $n_\perp$较小，有 $n_o=n_\perp$。传播速度 $v=c/n$，折射率大的方向光的传播速度慢，折射率小的方向光的传播速度快。

在向列相液晶中，$n_{/\!/}$折射率较大，光的偏振方向与分子长轴方向平行时，传播速度慢，如图 2.16(a)所示；$n_\perp$折射率较小，光的偏振方向与分子长轴方向垂直时，传播速度快，如图 2.16(b)所示；在真空中传播时，传播速度最快，为每秒 30 万千米，如图 2.16(c)所示。



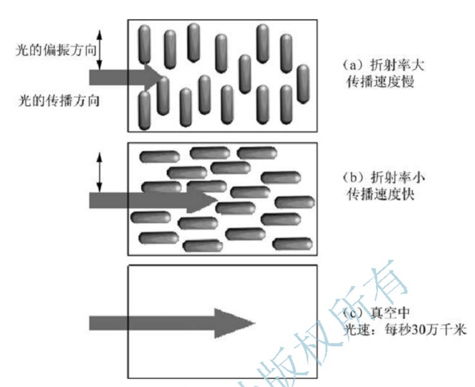


图 2.16　光在液晶中的传播速度

3. 能使入射光的传播方向偏向液晶分子长轴方向

光垂直射入两个均匀的各向同性物质中，光仍然直线行进，传播方向不变，如图 2.17(a)所示。但光垂直射入液晶后，光的传播方向可以不变，也可以改变。液晶分子垂直边界排列时，入射光与液晶分子的长轴平行，在光轴方向传播，入射光不发生双折射现象，只产生寻常光，光的传播方向不变，如图 2.17(b)所示；液晶分子与入射光方向有一定的角度(θ)排列，垂直纸面的偏振光在液晶中传播时，光在平行于分子轴和垂直于分子轴方向的传播速度分别为：$\upsilon_{/\!/}=c_{/\!/}/n_{\perp}$ 和 $\upsilon_{\perp}=c_{\perp}/n_{/\!/}$，沿直线行进，光的传播方向不变，如图 2.17(c)所示，像这样不发生折射的光线称为寻常光；平行纸面的偏振光在液晶中传播时，由于发生了双折射现象，光在平行于分子轴和垂直于分子轴方向的传播速度分别为：$\upsilon_{/\!/}=c_{/\!/}/n_{\perp}$ 和 $\upsilon_{\perp}=c_{\perp}/n_{/\!/}$，$c_{/\!/}=c\cdot\cos\theta$，$c_{\perp}=c\cdot\sin\theta$，$c$ 是真空中的光速。由于向列相液晶中 $n_{/\!/}>n_{\perp}$，$\upsilon_{/\!/}$ 大，$\upsilon_{\perp}$ 小，因此入射光的传播方向向液晶分子长轴方向偏移，如图 2.17(d)所示，像这样发生折射的光线称为非寻常光。

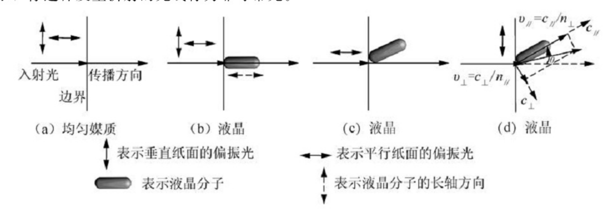


图 2.17　液晶分子可以改变入射光的传播方向

因此，改变液晶的排列方式可以改变入射光的传播方向。若在液晶后面再加一个偏振片，则通过的光强会发生变化。

4. 能使入射光偏振光状态或偏振方向发生改变

偏振光经过液晶后其偏振方向有时会改变。当偏振光的方向与 x 轴成 θ 角入射时，在 x、y 方向上电场分量分别为：

$$E_x = E_0 \cos\theta \sin\theta(\omega t - k_1 z) \tag{2.2}$$

$$E_y = E_0 \sin\theta \cos\theta(\omega t - k_2 z) \tag{2.3}$$

其中 E 为电场强度，ω 为光的角频率，$k_1 = \omega n_{/\!/}/c$，$k_2 = \omega n_{\perp}/c$。当入射角 $\theta = 0$、$\pi/2$ 时，E_x或 $E_y = 0$，直线偏振光的偏振光状态和偏振方向完全不变。另相位差 $\delta = (k_1 - k_2)z$ 代入式(2.2)和式(2.3)得到：

$$\left(\frac{E_x}{\cos\theta}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{\sin\theta}\right)^2 - 2\frac{E_x E_y}{\cos\theta\sin\theta}\cos\delta = E_0^2 \sin^2\delta \tag{2.4}$$

当入射角 $\theta = \pi/4$ 时，式(2.4)可以简化为：

$$E_x^2 + E_y^2 - 2E_x E_y \cos\delta = \frac{E_0^2}{2}\sin^2\delta \tag{2.5}$$

线偏振光向 z 方向传播的同时，偏振光状态将按线、椭圆、圆、椭圆、线偏振光的顺序依次变化，而且线偏振光的偏振方向也发生改变，如图 2.18 所示。

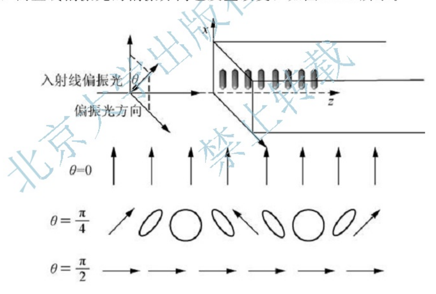
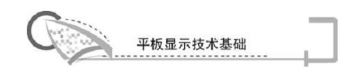


图 2.18 偏振光在液晶中传播的示意图

5. 能使入射偏振光左旋或右旋

当入射的平行线偏振光在液晶内沿着光轴方向传播时，线偏振光的偏振方向随着传播距离逐渐转动，这种现象为旋光现象，用 $\theta = \alpha \cdot l$ 表示，其中 θ 是旋转角度，α 是旋光系数，l 是通过液晶光轴的距离。有两种旋光状态：左旋和右旋。逆着光的传播方向观察，偏振方向顺时针方向旋转为左旋；逆着光的传播方向观察，偏振方向逆时针方向旋转为右旋。

当入射的偏振光的旋光方向与液晶分子的旋光方向相同时，如都是右旋光，入射光将被反射；当入射的偏振光的旋光方向与液晶分子的旋光方向相反时，如一个是右旋光，一个是左旋光，入射光可以透过液晶层。



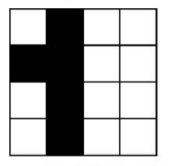
2.3.3 电导各向异性

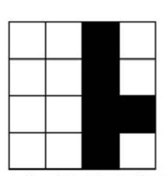
液晶属于绝缘体，通常情况下电导率很低。电导率在平行分子长轴与垂直分子轴方向的分量不同，称为电导各向异性。用$\sigma_{/\!/}$和$\sigma_{\perp}$分别表示。用$\sigma_{/\!/}/\sigma_{\perp}$表示电导各向异性的大小。向列相液晶平行分子长轴方向的电导率大于垂直分子长轴方向的电导率，$\sigma_{/\!/}/\sigma_{\perp}>1$，意味着在向列相液晶中离子沿平行于分子长轴方向运动更容易。近晶型液晶中，$\sigma_{/\!/}/\sigma_{\perp}<1$，离子沿垂直于分子长轴方向运动更容易，即在分子层隙间运动比较容易。

液晶中含有杂质或离子都会使电导率增高，因此要尽量避免引入杂质或离子。在一些溶致液晶中，离子浓度很高，电导率高，不能应用在显示中。杂质或离子主要是在加工制作过程中产生的，如基板的污染、取向层中的离子、液晶屏电极注入的电荷，以及液晶化合物的分解等都可以导致电导率增加。

典型的向列相液晶含有的离子浓度量级是$10^{16}\sim10^{20}\,m^{-3}$，电导率低于$10^{-11}$ S/cm。离子浓度高于$10^{20}\,m^{-3}$时，会导致显示器的寿命降低，并产生图像闪烁(Flicker)和残像(image sticking or ghosting)。闪烁是指屏幕上某些点的亮度产生瞬时变化的现象。残像是指液晶屏施加信号电压后，显示屏上有影像残留的现象，实际上就是第一次显示的静态画面长期停留在显示器上。当显示第二画面时，第一次显示的静态画面的残存影像仍然可以分辨出来，如图2.19所示。闪烁和残像与液晶中两种状态的离子有关，如快态和慢态。快态与快离子有关，在电场作用下引起离子的传输，导致在相对低的频率下光传输中图像的闪烁，获得错误的灰度级。慢态是一种慢效应，在长时间高于50mV以上的直流驱动下，引起离子的产生和移动。这些离子可以聚在取向层中，引起一个补偿电压，在施加的直流驱动去除后，这些离子导致的补偿电压还会持续很久，引起残像。

在扭曲向列相模式(Twist Nematic，TN)和平面转换模式(In-Plane Switch，IPS)等的液晶显示产品生产制造过程中，取向和摩擦工艺很容易造成污染，混有离子性有机杂质，在直流电压下引起残像。因此，可以通过改变取向层材料、控制摩擦取向工艺进行改善和消除残像。


(a) 第一次显示的画面


(b) 第二次显示的理想的画面

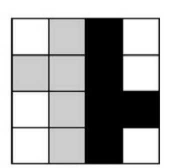

(c) 具有残像的画面

图2.19 离子传输影响下的画面

2.3.4 液晶的弹性常数

弹性常数是描述液晶分子弹性形变的物理量。液晶通常有3个弹性常数：展曲弹性常数(K_{33})、弯曲弹性常数(K_{11})、扭曲弹性常数(K_{22})，如图2.20所示。这3种形变是在

不同的外力作用下产生的。当经过表面处理的两片玻璃基板制作成尖劈形状的液晶盒时，中间充入向列相液晶，沿两片玻璃板表面附近的液晶分子长轴方向与玻璃基板相平行，那么内部的液晶分子就出现了展曲形变，如图2.20(a)所示；如果尖劈形状的液晶盒内，沿两片玻璃基板附近的液晶分子长轴方向与玻璃基板相垂直，那么内部的液晶分子就出现了弯曲形变，如图2.20(b)所示；当经过表面处理的两片玻璃基板制作成矩形状的液晶盒时，沿两片玻璃板表面附近的液晶分子长轴方向与玻璃基板相平行，但是上下两块基板表面的液晶分子长轴之间有一个不等于π的夹角，那么液晶内部就产生了扭曲形变，如图2.20(c)所示。

弹性常数主要影响液晶显示的阈值电压和响应时间。弹性常数形成了没有外场作用下，液晶盒制作完成取向后，液晶盒内液晶分子的排列状态。但是当施加电场后，液晶分子会由于介电异性按照电场方向排列，施加的电场改变了液晶分子由于弹性常数形成的排列状态。因此，弹性常数大，器件的开启需要施加的电压就越大，即阈值电压也越大。当施加的外加电压撤掉后，液晶盒内的液晶分子会由于弹性常数的作用又恢复到制作完成后液晶分子的排列状态，那么这个过程需要的时间为液晶的响应时间。因此，弹性常数大，液晶的响应速度快。

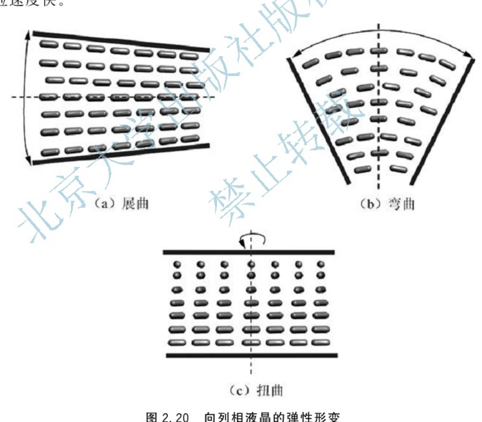


图2.20 向列相液晶的弹性形变

2.3.5 黏度

温度低时粘度的增加降低了液晶分子运动的几率，是限制液晶显示应用的主要因素。向列相液晶有4种黏度常数，如图2.21所示。①传输黏度常数η_1，方向是垂直于流动方向和平行于分子指向；②传输黏度常数η_2，方向是平行于流动方向和平行分子指向；③传



输黏度常数 η_3，方向是平行于流动方向和垂直分子指向方向；④旋转黏度常数 γ，方向是沿分子轴方向旋转。前 3 个是传输性黏度常数，第 4 个是旋转黏度常数。

旋转粘度常数是影响液晶显示性能的主要参数。对液晶显示的响应时间和余辉时间等动态特性影响较大。黏度大的材料，响应时间长。

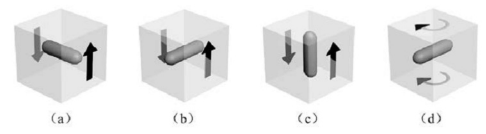


图 2.21 传输和旋转黏度常数的定义

2.3.6 有序参数

液晶显示器中常采用垂直取向处理或平行取向处理形成表面液晶分子的取向排列，但是并非所有的液晶分子都能相互平行和相对玻璃基板整齐、有序地排列。表征液晶分子整齐有序排列的参数称为有序参数(S)，在液晶应用中是极其重要的，用式(2.6)表示。

$$S=\frac{1}{2}(3\cos^2\theta-1) \tag{2.6}$$

其中 θ 为液晶分子长轴与单位矢量 n 的夹角。有序参数的大小直接影响液晶在折射率、介电常数等方面各向异性的大小。各向同性的液体，分子长轴的取向方向完全紊乱时，认为 $S=0$。当所有液晶分子全部处于平行取向(或垂直取向)的理想状态时，认为 $S=1$。而典型的向列相液晶，$S=0.4\sim0.7$。S 值与分子结构中所含环结构有关，末端烷基链长度的增加将使有序参数逐渐降低。

2.3.7 其他参数

1. 液晶材料的相变温度

液晶材料由固态转变成液晶态，或者从液晶态转变成液态，转变温度称为液晶材料的相变温度。近晶相—向列相转变温度和清亮点决定了液晶的工作温度，如向列相液晶典型的应用温度范围为－40℃～100℃。

2. 螺距

胆甾相液晶还存在一个重要参数螺距，当不同层的分子长轴排列沿螺旋方向经历的变化后，又回到初始取向，这个周期的层间距称为胆甾相液晶的螺距。

总之，液晶材料的物理性质显著地影响显示器件的性能。表 2-1 列出了液晶显示器用的 5CB 液晶化合物和混合型液晶的物理特性。弹性常数和旋转的黏度决定着液晶的响应时间和阈值电压的主要因素；介电各向异性决定着液晶在电场下是 p 型还是 n 型的特性，大的介电常数可以降低阈值电压；光学各向异性决定着液晶的光学性质；阈值电压决定着在低功耗下的工作范围。

表 2-1 液晶显示器用的5CB液晶化合物和混合型液晶的物理特性

参数	5CB 液晶	典型的混合液晶
近晶相—向列相转变温度 T_{s-n}	30℃	−40℃
清亮点 T_{cp}	55℃	80℃
光学各向异性	$\Delta n=n_{\parallel}-n_{\perp}$ $=1.617-1.492=0.125$	$\Delta n=n_{\parallel}-n_{\perp}$ $=1.562.1.477=0.085$
介电各向异性	$\Delta\varepsilon=\varepsilon_{\parallel}-\varepsilon_{\perp}$ $=17.5-4.8=12.7$	$\Delta\varepsilon=\varepsilon_{\parallel}-\varepsilon_{\perp}$ $=10.5-3.5=7$
弹性常数	$K_{11}\approx K_{22}\approx K_{33}\approx 10^{-11}\mathrm{N}$	$K_{11}\approx K_{22}\approx K_{33}\approx 10^{-11}\mathrm{N}$
旋转黏度	$\gamma=150\mathrm{mPa\cdot s}$	$\gamma=100\mathrm{mPa\cdot s}$

2.4 液晶的电光效应

液晶的电光效应是指液晶在外电场下分子的排列状态发生变化，引起液晶屏的光学性质发生变化的一种电光调制效应。外加电场能使液晶分子排列发生变化进行光调制，同时又由于双折射性，可以显示出旋光性、光干涉和光散射等特殊的光学性质。液晶的电光效应是各种效应中最适合在显示方面应用的效应，备受瞩目。目前发现的电光效应种类很多，产生电光效应的机理也略有不同，如图 2.22 所示。本节将介绍几种典型的电光效应。

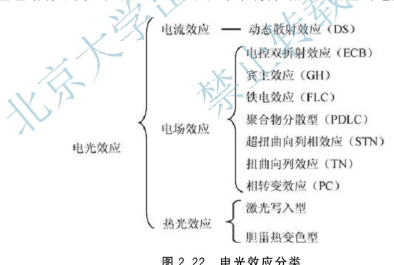
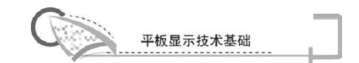


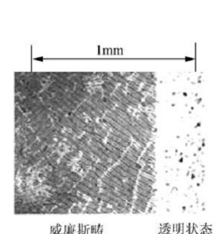
图 2.22 电光效应分类

2.4.1 动态散射效应

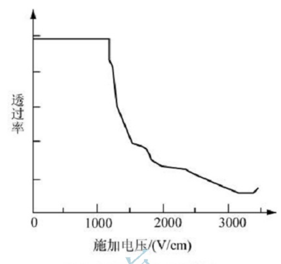
动态散射效应(Dynamic Scattering effect，DS)是一种电流型器件，最早应用于显示技术，开创了液晶显示器件的新时代，但功耗较大，现在已很少使用。

1963 年，威廉斯发现向列相液晶屏在不通电的情况下是透明的，透过率很高。在透明电极上施加垂直电场，且电压大于一定值时，出现长的平行静态条纹图案，称为威廉斯畴，如图 2.23(a)所示。当电压再增加时，透过率变得越来越低，如图 2.23(b)所示。





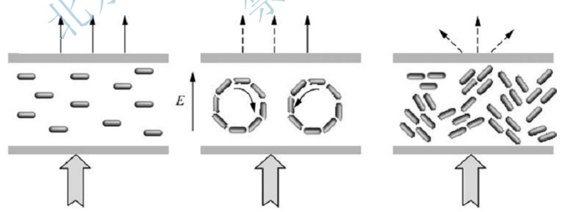
（a）威廉斯畴(左侧)和透明状态(右侧)



（b）在电场下的透光特性

图 2.23　威廉斯实验

这种现象就是动态散射效应。再向列相液晶中掺入一定比例的有机电介质，当一定频率的交流电通过时，随着电压的提高产生周期性的液晶分子环流，产生与液晶屏厚度相当的、间隔性的、周期性的静态条纹图案的威廉斯畴。如果电压继续提高，最终会形成对光产生强烈散射作用的紊流或搅动，透过率很低。动态散射过程为：步骤一，在液晶材料上施加电场，外加电场直接对液晶分子作用，使液晶分子长轴按照电场相应地排列，如 n 型液晶垂直电场方向有序排列，如图 2.24(a)所示；步骤二，液晶中微量杂质的带电粒子受电场作用后分别向两极移动，使离子所过之处液晶分子受到离子冲击而转动，破坏液晶分子的有序排列，如图 2.24(b)所示；步骤三，电场继续增加，液晶分子处于不断摇摆状态，发生紊乱，造成液晶屏各部分折射率分布的不均匀。几乎没有光通过液晶屏，入射光被散射掉，如图 2.24(c)所示。



（a）电场低液晶分子垂直电场排列（b）液晶分子在电场下带电粒子冲击下转动（c）发生紊乱而散射

图 2.24　液晶动态散射过程

动态散射效应在一定频率下才产生，受掺杂后的电导率、液晶材料的介电各向异性、粘滞系数、盒厚、驱动电压、弹性常数的影响。1968 年，海麦尔利用动态散射效应制作出了第一台液晶显示器及第一个液晶数字表，如图 2.25 所示。RCA 公司宣布的这种新型电子显示器不同于传统的 CRT，具有轻、薄、功耗低的特点。



(a) 海麦尔制作的第一个基于动态散射的液晶显示器



(b) 第一个液晶显示的数字表

图 2.25 RCA 公司的显示样机



发现故事：第一个液晶显示器

1888 年莱尼茨尔(F. Reinitzer)发现液晶材料后，由于历史条件的限制，当时并没有引起很大的重视，只是把液晶用在压力和温度的指示器上。直到 1963 年出现了转折点。美国无线电公司(RCA)普林斯顿研究所的一个从事微波固体元件研究已两年的年轻技术工作者 George Harry Heimeier 即将完成他的博士学位答辩。他有一个朋友正在从事有机半导体的研究工作，在上下班路上向 Heimeier 介绍了所从事的研究工作，使 Heimeier 产生了浓厚的兴趣。就这样，这位电子学专家改变了自己的专业，进入了有机化学领域，把电子学应用于有机化学。将染料与向列相液晶混合，夹在两片透明导电玻璃基片之间，施加几伏的电压，液晶屏由红色变成透明态，如图 2.26 所示。Heimeier 心想：这不就是平板电视吗？这个大胆的想法让 RCA 公司领导极为重视，将其列为企业的重大秘密。直到 1968 年 5 月，美国 RCA 在纽约召开的液晶显示器新闻发布会震撼了世界。当时 Heilmeier 断言，“布满梦想的壁挂式电视机只需数年就能实现”。

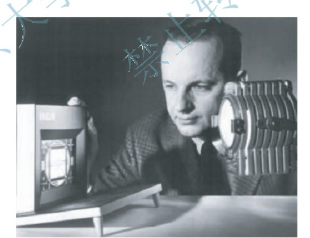
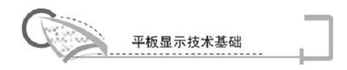


图 2.26 George Harry Heilmeier(1936.5.12—)

2.4.2 电控双折射效应

电控双折射效应(Electrically Controlled Birefringence effect，ECB)又称垂直排列相畸变效应，将具有负介电各向异性的向列相液晶材料、n 型液晶，采取垂直取向方法使液晶分子长轴垂直排列于上下两基片表面。通过施加电场，利用液晶分子的高度双折射性，控制液晶屏内分子倾斜程度的效应。电控双折射液晶显示器 ECB-LCD 在多彩色显示中是相





当重要的，适用于投影的大画面多色显示。

以上下两偏振片的光轴垂直贴的液晶屏为例，说明电控双折射效应显示的原理。不施加电压时，对垂直射入到液晶屏上的光线，入射光与液晶分子长轴平行，不发生双折射，经过垂直光轴的偏振片时，光不能透过，呈现黑态，如图 2.27(a)所示；当施加电压时，一方面在表面的液晶分子由于垂直取向作用而垂直于基板排列，另一方面由于介电各向异性作用 n 型液晶在电场下趋向于垂直于电场排列，即平行基板排列，在这种双重作用下，内部的液晶分子长轴发生角度为 ϕ 的倾斜。入射的直线偏光受到双折射作用，偏振状态发生改变，变成椭圆偏振光。于是部分偏振光透过上偏振片，透射光呈现不同的颜色，如图 2.27(b)所示。

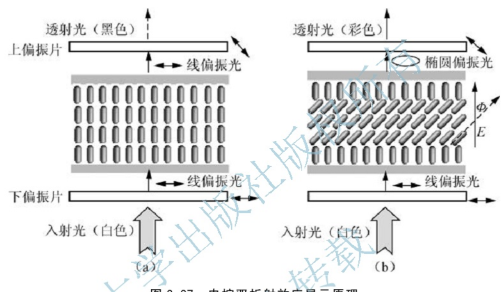


图 2.27　电控双折射效应显示原理

透射光的强度 I 与加在液晶屏上的电压和入射光波长有关。当入射光为白色光时，透过上偏振片的光产生干涉色，所加电压不同，显示的颜色不同。通过施加电压可以控制透射光的颜色变化，因此，电控双折射效应是一种可以进行色相调制的电光效应。透过上偏振片的光强度 I 为：

$$I = I_0 \sin^2 2\theta \sin^2\left[\frac{\pi d \Delta n}{\lambda}\sin^2\varphi(V)\right] \tag{2.7}$$

式中，I_0是入射光强度；θ 为下偏振片与液晶光轴垂直线之间的夹角；d 是液晶盒的厚度；λ 是入射光的波长；Δn 是折射率的各向异性；ϕ 是液晶分子长轴方向的倾斜角，是外加电压的函数。电控双折射效应的阈值电压 V_{TH} 可以表示为：

$$V_{TH} = \pi\sqrt{\frac{K_{33}}{\varepsilon_0 |\Delta\varepsilon|}} \tag{2.8}$$

式中，K_{33}是液晶材料的弹性常数，$\Delta\varepsilon$ 是介电各向异性。

2.4.3　宾主效应

宾主效应(Gust Host effect，GH)是指将二色染料作为客体(宾体)溶于特定排列的向列相液晶材料(主体)中，利用染料分子不同的吸收实现彩色显示的效应。

二色染料是分子长轴方向和短轴方向对可见光有不同吸收的各向异性染料，如图 2.28

所示。一般二色染料有两种，一种是正型(或 p 型)，光的偏振方向在平行于分子长轴方向有最大的吸收；另一种是负型(或 n 型)，光的偏振方向在垂直于分子长轴方向有最大的吸收。

以正型染料为例，说明宾主效应显示的原理。不加电压，线偏振光的方向平行于液晶分子的长轴方向，溶于向列相液晶主体材料中的二色性染料将会“客随主‘变’”地与液晶分子相同的方向排列。正型染料分子平行于长轴方向吸收最强，入射光被染料分子吸收，液晶屏显示彩色，如图 2.29(a)所示。

施加大于阈值电压 V_{TH} 的电压后，液晶分子在电场作用下平行于电场方向排列。二色性染料分子排列方向也将随液晶分子而变化，从而二色性染料对入射光的吸收也将发生变化。线偏振光的方向垂直于分子长轴方向，正型染料分子无吸收或吸收很弱，入射光完全透射，液晶屏呈现无色透明状态，如图 2.29(b)所示。宾主效应是一种彩色显示，不用偏光片或只用一个偏光片就可以获得足够对比度的显示效果，视角范围远比 TN 型的大得多。

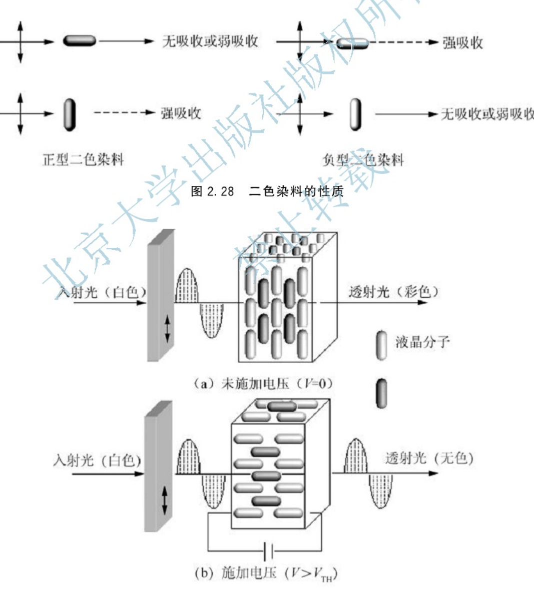
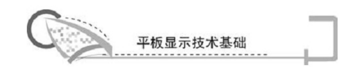


图 2.28　二色染料的性质

图 2.29　宾主效应实现彩色显示的过程



2.4.4 铁电效应

具有铁电效应的液晶材料称为铁电型液晶(Ferroelectric Liquid Crystal，FLC)。铁电液晶分子呈层状排列，与向列相液晶及胆甾相液晶不同，是有序度较高的近晶相。铁电体具有自发极化的性质，有两个或多个可能的取向。在电场作用下取向可以改变，具有像铁磁体一样的某种双稳态，并能表现出磁滞回线特性。自发极化就是在没有外电场作用下，介质的正、负电荷重心不重合呈现电偶极矩的现象。



发现的故事：铁电液晶显示

1975年，Meyer发现了手性近晶C相的液晶具有铁电性。1980年，Clark和Lager Wall成功研制出表面稳定的铁电液晶(Surface Stabilized Ferroelectric Liquid Crystal，SSFLC)，具有毫秒级响应速度和双稳态效应。1988年，Chadani等人发现了反铁电液晶(AFLC)，不仅响应速度快，且具有三稳态的双迟滞回线，非常适合于多路驱动。

1. 铁电液晶显示的种类

根据不施加电场时初始分子排列方式的不同，可以把手性近晶C相液晶的电光效应分为单稳态型(非存储型)和双稳态型(存储型)。单稳态型铁电液晶显示器的特点是：①上下基板均进行平行取向处理；②充入基板间的近晶相C相液晶的层面与基板面垂直；③基板间距离大，即液晶盒厚比手性液晶螺距大很多。

双稳态型铁电液晶显示器将单稳态型铁电液晶显示器的液晶盒厚度 d 变薄，让液晶盒厚度小于螺距 p，其他条件不变。双稳态型铁电液晶显示器由于强的界面效应，在 $E=0$ 下螺旋结构消失，全体液晶分子与基板表面平行排列，各层自发极化的排列方向相对于显示面为朝外或朝里整齐排列。

2. 铁电液晶显示器的显示原理

单稳态型铁电液晶显示器当外加电压为零，即 $E=0$ 时，每层中的液晶分子与层法线成相同倾斜角排列，层之间液晶分子在角方向作螺旋转动，每一层中分子同向排列，偶极矩也同相排列，会产生一定的自发极化。层之间自发极化的方向从层到层作螺旋转动，各层分量总和为零，总体不表现出自发极化，如图2.30(a)所示。

双稳态型铁电液晶显示器当外加电压为零，即 $E=0$ 时，螺旋结构消失，全体液晶分子与基板表面平行排列，各层上的液晶分子自发极化排列，方向相对于显示面为朝外或朝里的整齐排列，如图2.30(b)所示。

当对铁电液晶的液晶屏加上直流电压时，自发极化的偶极矩与电场相互作用，使液晶分子自极化方向指向电场方向，螺距变长。当电场超过一定值时，螺旋结构消失。当电场方向反向时，分子的极化方向也反向，液晶分子相对于层面法线的倾斜角也从 θ 变成 $-\theta$，即在基板面内变化了角度 2θ，如图2.30(c)和图2.30(d)所示。在 $E<-E_c$ 时，通过下偏振片的光通过铁电液晶层到上偏振片，与上偏振片光轴垂直，不能透光为暗态，如图2.30(c)所示；当 $E>+E_c$ 时，通过下偏振片的光通过铁电液晶层刚好扭曲了 2θ，与上偏振片光轴几乎平常，光透过为亮态，如图2.30(d)所示。

(a) 单稳态型 $E=0$

(b) 双稳态型 $E=0$

(c) $E<-E_c$

(d) $E>+E_c$

图 2.30 铁电液晶显示器的显示原理

单稳态型铁电液晶显示器在外加电场去除后，分子排列状态返回到初始状态，也就是由 $E>+E_c$ 和 $E>-E_c$ 的状态返回到单稳态型 $E=0$ 的状态。因此，只有电场为零的一个稳态，不具有存储功能，又称为非存储型铁电液晶显示器。

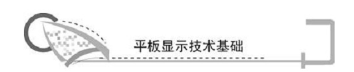
双稳态型铁电液晶显示器在外加电场去除后，分子排列仍保持施加电场后的状态不变，即仍然保持 $E>+E_c$ 和 $E<-E_c$ 的状态。因此，有两个稳定状态，一个是单稳态型 $E=0$ 的一个稳态，另一个是 $E>+E_c$ 和 $E<-E_c$ 的稳定态，又称为双稳态型，具有存储效应。

3. 铁电液晶显示器的特点

1）响应速度快

获得亮态的方法是利用双折射效应使线偏振光变成椭圆偏振光。表面双稳铁电液晶显





示 SSFLC 的厚度很薄，一般在 2μm 左右小于螺距，在自发极化强度和电场共同作用下响应速度可达到 10μs，图像的切换速度可达 30 帧/秒以上。向列相液晶在外电场作用下由电场引起的分子感生偶极矩的作用很弱，而铁电液晶的外电场与分子固有偶极矩间的作用很强。因此，铁电液晶远快于向列相液晶显示。

2）存储性

SSFLC 的存储特性如图 2.31 所示，又称为光学双稳态，像标准芯片一样具有记忆功能，能自动保留最后一幅图像，还能在关机后再将图像取出来。因此，SSFLCD 能采用简单的多路驱动电路，具有很大的显示容量，目前已能实现行扫描线 1000 条以上的大容量显示。记忆功能可用于计算机上的静态画面的存储，具有节能作用。

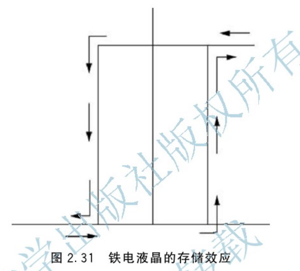


图 2.31　铁电液晶的存储效应

3）良好的对比度与视角特性

SSFLCD 对比度与视角之间制约的关系很小，视角>60°。

2.4.5　聚合物分散型

聚合物分散型(Polymer Dispensed Liquid Crystals，PDLC)就是将低分子液晶与预聚物按一定比例相混合。在一定条件下聚合反应，形成微米级的液晶微滴，均匀地分散在高分子网络中。再利用液晶分子的介电各向异性获得电光响应特性，工作在散射态和透明态之间具有一定的灰度。由于制备工艺简单，不需偏振片和取向层，可以实现大面积和高亮度显示，在可控窗和投影显示等领域显示出很大的应用前景。

逐渐减少聚合物材料在混合体系中的含量，当降到 10%以下，经光聚合处理后，在液晶中形成了三维结构的聚合物网络。液晶分子在这种网络结构的三维体效应作用下取向，比基板表面的取向层对液晶分子的取向作用更强烈、更有效，可以很好地改善显示器的电光特性。为区别于传统的 PDLC，将这种混合体系称为聚合物促使稳定的胆甾相液晶织构(Polymer Stabilized Cholestoric Texture，PSCT)是一种多稳态液晶显示器。

1. 液晶的晶畴结构

液晶是介于晶体和液体之间的一种物质，具有液体的流动性，又在一定程度上具有晶体的有序性等基本性质。液晶还有一种与晶体相似的性质，就是晶畴结构。如向列相液晶



并不是全部液晶分子取向都是大体一致的连续整体，而是分成了许多的液晶畴。在每个畴内，分子有大体一致的取向，各畴之间的指向矢呈无序分布。液晶在表面上看呈乳白色，就是光线通过各向异性的液晶畴时，因折射率的不同光散射的结果不同。向列相液晶的液晶畴不具有稳定性，在显示过程中把液晶看成了一个宏观的整体，液晶畴的作用被忽略了。但是胆甾相液晶的液晶畴在狭窄的液晶盒内能够保持各向不同的取向，并且具有长期的稳定性。胆甾相液晶畴的集合，如图 2.32 所示。黑线表示每个液晶畴中液晶的对称轴。整体上看，各个液晶畴对称轴的分布是散乱的；每一个液晶畴内的液晶分子长轴方向呈螺旋排列，如图 2.33 所示。

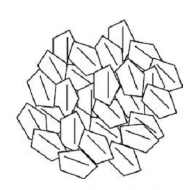


图 2.32　胆甾相液晶畴的集合

对称轴

图 2.33　液晶畴内液晶分子的螺旋排列

2. 多稳态液晶显示器的单色显示

如果胆甾相液晶畴的对称轴方向大体一致，并且垂直于液晶屏表面，调节胆甾相液晶的螺距，满足：

$$\lambda = n \cdot P \tag{2.9}$$

式中，n 是液晶的平均折射率；P 为螺距；λ 是可见光波长。

胆甾相液晶畴对 λ 波长附近的部分圆偏振光有很强的布拉格反射，其余的光都透过液晶层，被背面黑色涂料全部吸收。观察者只能看见在 λ 附近某种颜色的反射光。

3. 多稳态液晶显示灰度级的实现

胆甾相液晶畴的对称轴方向并非完全一致，当液晶畴对称轴有序排列时，反射光分布在以入射光相应的反射线为轴的锥体内，如图 2.34 所示。调整“$n \cdot P$”的数值，布拉格反射光的颜色随之变化，可以呈现不同的彩色，显示器呈现亮态；当液晶畴对称轴杂乱排列时，只有一小部分微弱的散射光，绝大部分光线都透过液晶材料被黑色涂料吸收，显示器呈现黑态。当液晶畴对称轴排列方向，介于这两种极端状态之间时，便构成了无穷的稳态，显示器可以实现不同的灰度级。

胆甾相液晶的多稳态显示器的每一个状态的稳定性都不是暂时的，在电场、温度、压力的不均性控制在一定范围内，多稳态几乎是永久性的，是一种真正的多稳定状态。

4. 多稳态之间分子排列结构的转换

多稳态液晶显示中的胆甾相液晶具有 3 种不同的分子排列结构：平面织构状态(Planar Texture，P 态)、焦锥织构状态(Focal conic texture，FC 态)、垂直织构状态



(Homeotropic texture，H 态)。平面织构状态中液晶畴的对称轴基本与液晶屏表面垂直，每个畴内的液晶分子具有周期性的螺旋结构，如图 2.35(a)所示。平面织构状态中，入射光的波长与螺距 p 相匹配，光将被反射，反射光为圆偏振光，如图 2.34 所示。

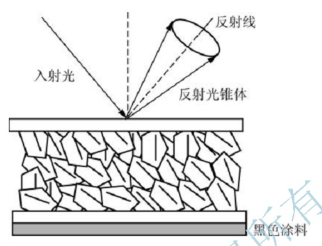


图 2.34 多稳态液晶显示器中的锥体反射光

焦锥织构状态是一种多畴结构，如图 2.35(b)所示。每个液晶畴内的液晶分子依然呈螺旋结构周期性排列，但整体的液晶畴不再周期性排列，其对称轴分布杂乱无章，大体取向平行基板，对入射光会产生散射。

垂直织构状态又称场致向列相，液晶分子沿电场方向排列，液晶是透明的，如图 2.35(c)所示。

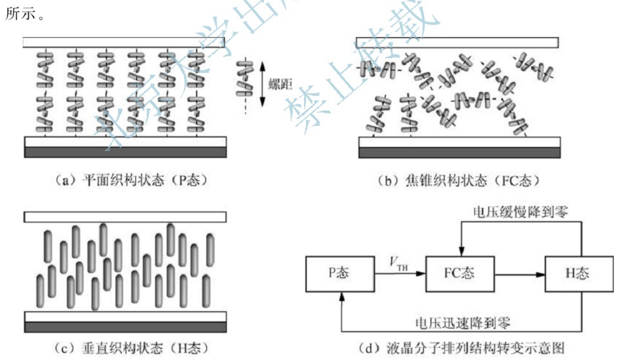


图 2.35 胆甾相液晶的分子排列结构

当电压很小时，胆甾相液晶的螺距和液晶分子指向矢的均匀性大致保持不变，保持平面织构状态，如图 2.35(a)所示。当电压增加时，但小于相变电压 V_c 值时，胆甾相液晶可以从平面织构状态(P 态)逐步转换为焦锥织构状态(FC 态)。



焦锥织构状态的液晶螺距变长，液晶分子指向矢趋于和外电场方向一致。同时，在电场作用下，所有液晶畴的对称轴都会在原来各自倾斜的方向上克服畴之间的摩擦力，使液晶畴的对称轴向平面倒下，如图 2.35(b)所示。只有微弱的反向散射全部透过光被黑色涂料吸收，呈现黑态。焦锥织构状态是一个零场稳定态。

当电压超过相变电压 V_c 时，胆甾相液晶在强电场下被迫相变转化成向列相液晶，如图 2.35(c)所示。液晶分子指向矢都和外电场一致，为场致向列相状态。当电压迅速降到零时，电场撤销的瞬间，系统处于最高能态，将克服一切障碍回到最低能态，液晶分子转变为平面织构状态(P 态)。使液晶畴的对称轴大致都垂直于显示器表面，呈现亮态。当电压缓慢降低时，液晶分子转变为 FC 态，呈现黑态。

当加上小于某个阈值电压，$V<V_{TH}$，一段时间后撤销，显示器维持原有状态 P 态不变；当加的电压 $V_{TH}<V<V_c$，一段时间后撤销，显示器转变为 FC 态，为黑色，系统能量升高；当电压 $V>V_c$，转变为 H 态，一段时间后迅速撤销，显示器跳到亮态。多稳态之间分子排列结构的转换过程示意图如图 2.35(d)所示。阈值电压指的是在小于这个电压作用下不引起原有状态变化，但随着每一个畴的大小，取向不同，畴间的摩擦力不同，阈值电压都会有升降。

胆甾相液晶的 3 种状态具有布拉格反射特性的 P 态和呈现散射状态的 FC 态都是零场稳定态，H 态在没有电场下是非稳定态。

5. 多稳态液晶显示的特点

(1) 具有长期稳定性。在零电压下，显示器的每一个像素长期稳定在不同的状态；加适当的脉冲可促成不同稳态之间的转换。因此，这种显示器可以实现多层次高密度多路驱动，且不用耗电也可以长期保持显示内容。

(2) 不用背光源。在环境光照下已可十分清晰显示，有很高的对比度。因此，稳态液晶显示器可大大节省背光源的用电和制作成本。

(3) 不用偏振片。结构简单，视角宽阔，成本较低。

2.5　液晶显示器的种类

从 1888 年发现液晶到 1963 年第一个液晶显示器的出现，研究人员利用各种电光效应制作出了不同种类的液晶显示器，掀开了平板显示的序幕。到 1971 年，由瑞士 H. Roche 公司的 Schadt 等人制作出第一个的扭曲向列型液晶显示器(TN-LCD)，这是液晶显示器真正实用化的开始，其已经获得广泛应用。本节重点介绍当今时代主流的几种利用电光效应的液晶显示器的显示原理。

液晶显示器除按照电光效应不同分类外，按照是否含有有源器件还可分为无源矩阵液晶显示器和有源矩阵液晶显示器。单纯在两块玻璃之间注入液晶材料的结构称为无源矩阵 LCD；在内部引入薄膜晶体管或二极管等有源器件作开关器件，再注入液晶材料的结构，称为有源矩阵 LCD。二者的驱动方式不同，用途也不同。按材料和显示原理分，无源矩阵和有源矩阵的液晶显示器又分别包括很多种，如图 2.36 所示。

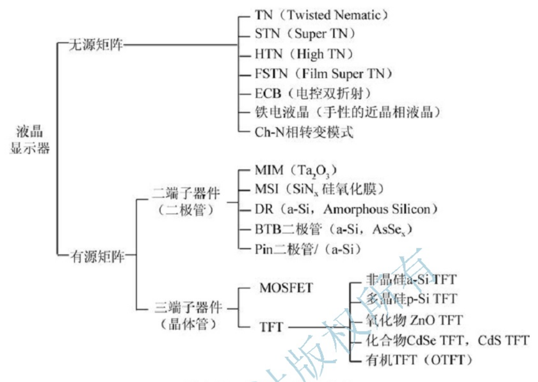


图 2.36　液晶显示器的种类

MOSFET：Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor，金属氧化物半导体场效应晶体管；
TFT：Thin Film Transistor，薄膜晶体管；
MIM：Metal Insulator Metal，金属-绝缘体-金属；
MSI：Metal Semi-Insulator Metal，金属-半绝缘体-金属；
D R：Diode Ring，二极管环；
BTB：Back To Back Diode，背靠背二极管；
ECB：Eletrically Coutrolled Birefringence，电控双折射

2.5.1　几种液晶显示器的简介

TN-LCD 是 Twist Nematic Liquid Crystal Display 的简称，即扭曲向列相液晶显示器。特点是液晶分子基本平行于基板排列，但上下液晶分子取向呈扭曲排列，整体扭曲角为 90°。TN-LCD 是人们发现较早，也是应用范围最广、数量最多、价格最便宜的液晶显示器。日常所见到的电子表、计算器、游戏机等的显示屏大都是 TN-LCD。

STN-LCD 是 Super Twist Nematic Liquid Crystal Display 的简称，即超扭曲向列相液晶显示器。为了实现大信息容量的多路驱动液晶显示，人们提出了液晶分子的指向矢扭曲 180°～270°的超扭曲向列(STN)和超扭曲双折射效应(SBE)液晶显示模式。STN-LCD 是目前 LCD 生产的中档产品，具有显示信息量大等特点，主要用于各种仪器仪表、汉显机、记事本、笔记本计算机等。

STN-LCD 和 SBE-LCD 具有较好的电光曲线的陡度特性和光电响应特性，尤其是扭曲角为 270°的 SBE-LCD 的扫描行数可以高达 300 行。然而 SBE-LCD 需要 20°以上的高预倾角才能稳定。预倾角太低，在驱动过程中容易出现条纹织构，从而大大降低器件的陡度特性和显示质量。



HTN-LCD 是 High Twist Nematic Liquid Crystal Display 的简称，即高扭曲向列相液晶显示器。与 TN-LCD、STN-LCD 的结构相似，扭曲角在 100°～120°之间。HTN-LCD 目前数量不多，其性能也介于 TN-LCD 和 STN-LCD 之间。

FSTN-LCD 是 Film Super Twist Nematic Liquid Crystal Display 的简称，即补偿膜超扭曲向列相液晶显示器。Film 是指补偿膜或延迟膜。通过一层特殊处理的补偿膜能克服 STN-LCD 有背景色，可实现黑白显示，又称为黑白模式的 STN-LCD。

TFT-LCD 是 Thin Film Transistor Liquid Crystal Display 的简称，即薄膜晶体管有源矩阵液晶显示器，每个像素都是由一个(或多个)薄膜晶体管开关来控制的。实际上每个像素就是一个小的 TN 型液晶显示器。显示的图像清晰、无闪烁、视角宽，响应速度较快，并且能显示几乎任意灰度，加上彩膜后可以实现全彩色显示，用玻璃等透明基板能透射式显示，信号传递性能好，显示的色调均匀，可以大容量显示。TFT-LCD 是目前 LCD 市场中最高档次的产品，主要用于智能手机、笔记本计算机、液晶电视等。

2.5.2　液晶的不同取向排列

不管哪一种液晶显示器都是在电场的作用下改变了液晶的光学性质。除液晶材料种类的不同外，还采用了不同的表面取向技术，使得液晶分子有特定的排列状态及不同的初始光学性质。施加电场后，改变了液晶分子的排列状态实现不同的显示。常见的液晶分子排列模式如图 2.37 所示。

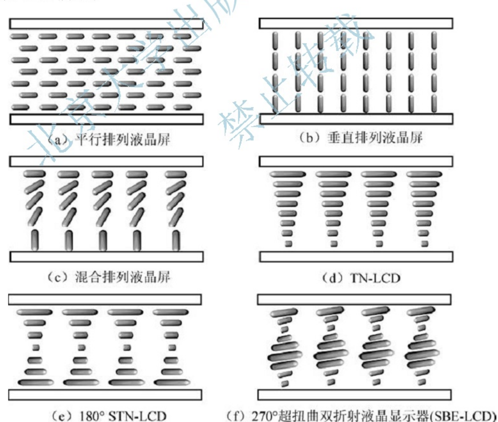


图 2.37　常见的液晶分子排列模式

上下基板表面的液晶分子长轴方向一致，且平行于基板排列，为平行排列液晶屏；上



下基板表面的液晶分子长轴方向一致，且垂直于基板排列，为垂直排列液晶屏；上基板表面的液晶分子平行于基板排列，下基板表面的液晶分子垂直于下基板，中间的液晶分子由于弹性和黏度相应地旋转，为混合排列液晶屏；上下基板表面的液晶分子分别平行于基板排列，但长轴方向垂直，这样液晶分子从上到下基板扭曲了 90°，为扭曲排列的液晶屏，即 TN-LCD；上下基板表面的液晶分子分别平行于基板排列，长轴方向扭曲 180°后平行，中间液晶分子从上到下基板共扭曲了 180°，为超扭曲排列的液晶屏，即 STN-LCD；上下基板表面的液晶分子长轴方向与基板成一定角度，且从上到下基板共扭曲了 270°，为倾斜排列液晶屏，即超扭曲双折射液晶显示器(SBE-LCD)。

2.6 TN 型液晶显示器的显示原理

2.6.1 TN 型液晶显示器的基本结构

TN 型液晶显示器是由偏振片、玻璃基板、彩膜、透明电极(ITO)、取向层和液晶组成的，如图 2.38 所示。TN 型液晶显示器结构为：首先，在上下两块玻璃基板的表面上制作一层透明导电薄膜。透明导电薄膜有好的导电性、高的透明性。目前最常用的透明导电薄膜是氧化铟锡薄膜，即 ITO 薄膜。透明导电薄膜经光刻刻蚀制成特定形状的显示电极，构成图形的显示部分。在电极上加适当电压信号，使液晶分子的排列状态改变，就可以显示出相应的图像。接着，透明导电膜上覆盖一层取向层(如聚酰亚胺)，经摩擦后形成许多细小的沟槽，对基板表面的液晶分子取向。其次，两块基板对到一起，四周用密封材料(一般为环氧树脂)密封，内部充满正性液晶。最后，在液晶屏的上下基板外侧贴上偏振片。上下玻璃片之间的间隔为盒厚，一般为 3～8μm。

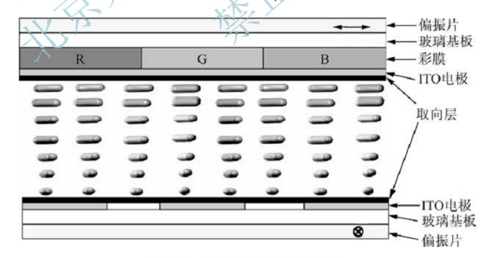


图 2.38　TN 型液晶显示器的结构

实现彩色显示的方法是在液晶盒内的其中一片玻璃基板上制作的彩膜，再在彩膜上面制作 ITO 电极。彩膜为混有染料或颜料的透明聚合物薄膜，用光刻、电泳或印刷的方法，按红、绿、蓝三种颜色排列。此外，TN 型液晶显示器的向列相液晶中，要加入少量的手性材料，如左旋材料或右旋材料，使整个液晶盒内的液晶分子的旋向一致。

2.6.2　偏振光的产生

普通光源发出的光是有许多振动方向光波的总和，振动方向是无规则性的。光在传播过程中，由于光波与物质的相互作用，造成各个振动方向上的强度不等。当物质吸收一些方向的振动后，投射出某一方向的光叫线偏振光。若某一方向的振动比其他方向的振动更占优势，称为部分偏振光。偏振光在液晶显示器中占有重要的地位，多数液晶显示器都是通过电场来控制液晶分子的取向，从而控制偏振光的传播来达到显示的目的。

在液晶显示中用人造的偏振片来获得偏振光。光源的光投射到偏振片上，每一振动方向上的光矢量分解成平行于偏振片光轴的分量和垂直于光轴的分量。垂直于光轴的分量被偏振片吸收，平行于光轴的分量投射出去。透过偏振片的光只在一个垂直传播路径的方向上振动，这一个特定的方向称为透射轴，与这个方向垂直的分量被阻挡，这个方向称为吸收轴，如图 2.39 所示。因此，偏光片是只允许在某一个方向振动的光波通过，而其他方向振动的光将被全部或部分地被阻挡。

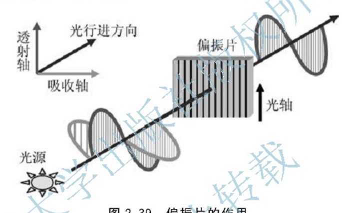


图 2.39　偏振片的作用

理想的偏振片可以吸收自然光 50%的入射光，获得 50%的偏振光。只有平行于偏振片透射轴的光才能透过。两片偏振片放在一起，当上下偏振片光轴垂直时，如图 2.40(a)

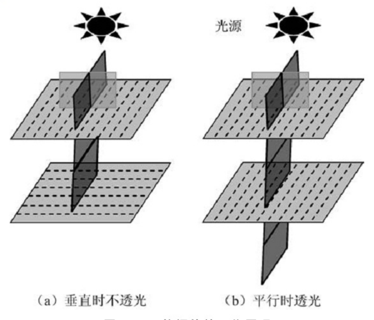
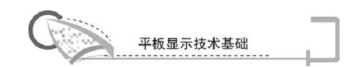


图 2.40　偏振片的工作原理



所示，透过上偏振片的光与偏振片的透射轴方向一致，到下偏振片时，与下偏振片的光轴垂直，偏振光受到阻挡，这时不透光；当上下偏振片光轴平行时，如图 2.40(b)所示，透过上偏振片的光与下偏振片的光轴方向一致，这时透光。

2.6.3 TN 型液晶显示器的工作原理

TN 型液晶显示器要在玻璃基板的外面贴上两张偏振片，偏振片的光轴可以相互垂直，也可以相互平行。以两张偏振片的光轴垂直贴的液晶屏为例，说明 TN-LCD 的工作原理，如图 2.41 所示。

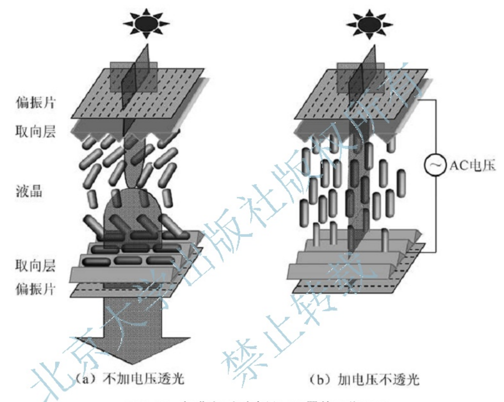


图 2.41 扭曲向列型液晶显示器的工作原理

在不加驱动电压时(off 态)，来自光源的自然光经过上偏振片后只剩下平行于透光轴的线偏振光。线偏振光射入液晶层。液晶层内的液晶分子由于上下基板表面取向层的作用，从上到下刚好扭曲 90°。光在传播中，偏振方向随液晶分子扭曲结构同步旋转。光到达下偏振片时，偏振面刚好旋转了 90°，正好与另一片偏振片的光轴平行，光可以透过，呈现亮态。

在施加足够电压时(on 态)，由于正性液晶的介电各向异性和电场的相互作用，液晶分子扭曲结构解体，液晶分子长轴平行于电场方向，线偏振光的偏振方向在盒中传播时不再旋转，保持原来偏振方向到达下偏振片。正好与下偏振片的光轴正交，无光输出，呈现暗态。

当一些像素透光，而另一些像素不透光，就会显示出明暗不同的图像。两个偏振片透光的光轴垂直，无外加电压时，液晶显示器为透光状态，为亮态；加上外界电场后，随电场的增加透过的光强逐渐减小，最后透光率趋近于 0。这种模式称为常白模式(Normally White mode)，可以实现在白色背景上显示黑色图案。

当两个偏振片的光轴平行时，不加电压下无光输出，为暗态；加上外加电压后，随电压的增加透过的光强逐渐增加，最后达到饱和的透光率，呈明亮状态。这种模式称为常黑模式(Normally White mode)，可以实现在黑色背景上显示白色图案。

用电光特性曲线反应液晶显示器在电场下的响应特性。常白模式的电光特性如图 2.42 所示。在理想情况下，不加电压几乎 100%地透过。电压由低到高变化时，透光率变化到 90%时的电压为阈值电压(V_{TH})。电压继续增加，透过率降到 10%时的电压为饱和电压(V_{Sat})。通过控制电压的数值可以获得不同的灰度级。常黑模式的电光特性刚好相反。

常白模式 LCD 液晶屏厚度不均匀对画面质量的影响较小，且在加电压时容易得到与波长无关的黑色。但常黑模式 LCD 经常会由于某一波长漏光而产生色彩的变化有易带色的缺点，且屏内的缺陷很容易显现。

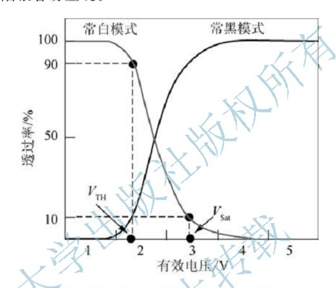


图 2.42 常白与常黑模式的电光特性

2.6.4 TN 型液晶显示器的优缺点

无源矩阵的 TN 型液晶显示器利用了液晶分子的扭曲效应，是一种电场效应。液晶的电阻率大，电流小、功耗低，寿命可达数年。虽然广泛使用，但只限于液晶显示器的低档产品。其缺点如下。

1. TN 型液晶的电光特性不陡

液晶分子扭曲 90°，电光特性曲线不够陡峭。在点阵模式下显示图像时，没有点亮的像素与点亮的像素之间所加的驱动电压差别不大，交叉串扰效应严重。扫描的行数越多，电压的差别越不明显，在多路驱动中只能工作于 100 条扫描线以下。

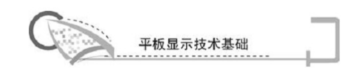
2. 电光响应速度慢

无源矩阵的 TN 型液晶显示器的响应速度为 50ms 左右，只适于显示静止或者很慢的画面，不适用于视频显示。

3. 光透过和关闭都不彻底

只能做到灰底黑字的效果，达不到白底黑字的效果，对比度不好。





2.7 超扭曲向列相液晶显示器

TN型液晶显示器由于电光特性不陡，多路寻址的行数受限制，只能用于低端的显示。而大信息容量的液晶显示器要求电光曲线特别陡峭，可以说越陡峭越好。也就是要求液晶分子在某一很窄的电压范围内存在液晶分子长轴方向(或者指向矢)的跳变特性。

在20世纪80年代初，研究人员发现只要将传统的TN液晶显示器件中液晶分子扭曲角加大，就可以改善电光特性的陡度。把这类扭曲角大于90°、一般在180°～360°的显示器称为超扭曲向列相液晶显示器。虽然STN型只是比TN型的扭曲角加大，但是显示原理却不同。

2.7.1 显示原理

以常白模式的上、下基板的两个偏振片光轴垂直贴为例，说明STN型液晶显示器的显示原理，如图2.43所示。

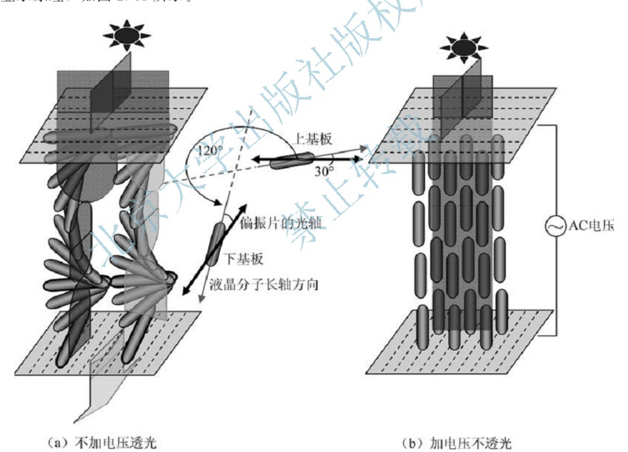


图2.43 STN LCD的显示原理

在STN型液晶显示器中，基板表面的液晶分子与偏振片光轴方向不同。入射光侧液晶分子长轴方向与上偏振片的光轴旋转30°(β)，而出射光侧的液晶分子长轴方向与下偏振片的光轴旋转60°(γ)。入射光进入上偏振片后，偏振光被分解成与分子长轴方向平行和垂直的偏振面的寻常光和非寻常光。在液晶中传播速度的不同，光通过下偏振片时

相互发生干涉。不加电压时，在液晶分子旋光和光的双折射共同作用下透光，呈现黄色；加上一定的电压，液晶分子沿电场方向排列，从上偏振片透过的光，穿过液晶分子后到下偏振片，由于与下偏振片光轴垂直，不透光，呈现黑色。因此，STN型显示本身能显示颜色。

当上下两个偏振片垂直贴，且方位角β为30°左右、γ为60°左右时，不加电压显示黄色，加电后显示黑色，黄色背景下显示黑色图案称为黄模式；当上下两个偏振片接近平行贴，且方位角β为$-30°$左右、γ为30°左右时，不加电压显示为藏青色，加电压后呈现白色，蓝色背景下显示白色图案称为蓝模式。在STN型液晶显示中，干涉强度与延迟$\Delta n \cdot d$、偏振片方位角(β和γ)和扭曲角ϕ有关系。三者最佳组合时，液晶分子取向微小的变化将引起输出光较大的变化，使光电特性变得更加陡峭。

2.7.2 STN与TN液晶显示器显示原理的差别

1. 扭曲角不同

TN液晶屏中扭曲角为90°；STN液晶屏中扭曲角为180°～360°，一般为270°。

2. 偏振片的光轴方向不同

在常白模式TN型液晶屏中，上下偏振片的光轴分别与上下基板表面的液晶分子长轴平行，且上下偏振片光轴之间互相成90°。STN型液晶屏中，上下偏振片的光轴与上下基板表面的液晶分子长轴都不相互平行，而是成一个角度。

3. 光学特性不同

TN型液晶屏是利用液晶分子的旋光特性工作的；STN型液晶屏是利用液晶的双折射特性工作的。STN型液晶屏是光源的光经过上偏振片后成为线偏振光，由于入射的线偏振光和液晶分子成一定角度，使入射光发生双折射现象，分解成寻常光和非寻常光。两束光通过液晶屏后，产生光程差，再通过下偏振片时发生干涉。

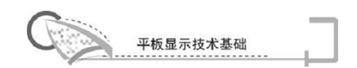
4. 显示色彩不同

TN型液晶显示器工作在黑白模式下显示黑色和白色；STN型液晶显示器一般工作于着色模式下，干涉色为黄、绿或蓝色，加上彩膜可以实现全彩色。

2.7.3 STN LCD实现黑白显示的方法

为消除STN型LCD的干涉色，实现黑白显示采用的方法有：一种是加滤色膜，如灰模式STN，但透过光损失大；另一种是加光学补偿，有DSTN和FSTN两种补偿。DSTN(Double-layer Super-Twisted Nematic)，也是一种无源显示技术，过去主要应用在一些笔记本电脑上。使用两个STN屏，两个屏扭曲角相同、扭曲方向相反来光学补偿，解决传统的STN显示器中的漂移问题。同时采用双扫描技术，显示效果较STN显示器有大幅度的提高。但DSTN的上下两屏同时扫描，在使用中有可能在显示屏中央出现一条亮线，且双屏技术造价高，技术要求高，不方便，现在已很少应用。

FSTN用光学相位差膜(补偿膜)进行光学补偿，称为FSTN。与普通的STN的区别

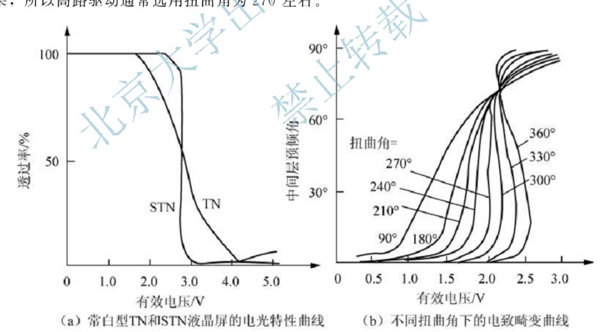


是使用的偏振片不同，具有良好的动态驱动性能及视角宽度，可以补偿 STN 的干涉颜色，实现真正的黑白显示，具有较好的对比度。现在一般使用的是 FSTN 和灰模式的 STN。

2.7.4 STN-LCD 显示的电光特性

在多路寻址中，不能依靠改变液晶材料的参量来增加 TN 型显示的电光特性曲线陡度。在计算机模拟中发现，将液晶层的扭曲角从 90°增加到 180°～270°，可以大大提高曲线的陡度，甚至可以增加到无穷大。STN-LCD 利用电场作用引起液晶分子取向变化，并结合光学双折射效应，具有陡峭的电光特性，如图 2.44(a)所示。当电压比较低时，光线的透过率很高；当电压很高时，光线的透过率很低；而当电压在中间位置时，TN 液晶显示屏的变化曲线比较平缓，而 STN 液晶显示屏的变化曲线则较为陡峭。

实现高对比度，直接多路驱动，要求电光特性曲线足够陡峭，同时还必须有一个陡峭的电致畸变曲线。在不同扭曲角下，中间层液晶分子倾角(Mid-layer Tilt Angle)与有效电压的关系为电致畸变曲线，如图 2.44(b)所示。可以看出，90°扭曲角液晶显示器的中间层液晶分子的倾角与有效电压关系比较平坦，增加扭曲角可以使倾角与有效电压的关系变陡峭。当扭曲角为 270°时，曲线具有无穷大的斜率，意味着扭曲角为 270°的电光曲线可能会非常陡峭，可以有极多数的扫描线数的驱动能力。在更大的扭曲角下，电致畸变曲线呈现 S 形，如扭曲角为 360°，曲线出现了双值，形成一个双稳定与迟滞性区域，影响显示效果，所以高路驱动通常选用扭曲角为 270°左右。



(a) 常白型TN和STN液晶屏的电光特性曲线 (b) 不同扭曲角下的电致畸变曲线

图 2.44 特性曲线

2.7.5 STN-LCD 显示的优缺点

STN-LCD 显示具有电光特性曲线陡峭和可以实现彩色显示等优点，最初广泛应用于手机等显示中，但灰阶低且响应时间长，促使人们在不断地开发新技术产品。



1. 电光曲线陡峭

STN-LCD 的电光曲线非常陡峭，适合多路驱动。

2. 彩色显示

在传统的单色 STN 液晶显示屏上加彩膜，并将单色显示矩阵的像素点分成 3 个像素单元(即 3 个子像素)，分别通过红、绿、蓝三基色彩膜，按一定比例调和，可以显示出全彩的画面。实际上，市场上的 STN 液晶屏的色彩只有 4096 色彩为“伪彩”。另外，TN 液晶显示屏做得越大，对比度就会越差，而 STN 型由于采用了改良技术，可以弥补对比度的不足。

3. 灰阶低

在电光特性曲线上，当透过率由 90%变化到 10%时，TN 型液晶显示屏的陡度大，对应的电压差大。STN 液晶显示屏陡度小，但对应的电压差也小。利用这个电压差来控制灰阶的变化，TN 型要比 STN 型液晶显示屏的灰阶变化多。一般 TN 型液晶显示屏多为 6～8bits 的变化，即 64～256 阶的灰阶变化；而 STN 型液晶显示屏最多为 4bits，即只有 16 阶的灰阶变化。

4. 响应时间长

STN 液晶显示屏的响应时间较长，多在 100ms 以上，一般为 200ms。响应时间很难再提高，屏幕上容易出现明显的闪烁和水波纹现象。而 TN 液晶显示屏多在 50ms 以下。

总之，液晶材料及物理性质决定了各种液晶显示器的显示原理和性能不同，对比见表 2-2。

表 2-2 各种模式的液晶显示器的材料及性能对比

工作模式	原理	液晶类型	分子排列变化	偏振片	显示特性	显示状态
DS 型	紊流散射	Nn＋有机电介质	垂直电场排列→紊流态畴	无	单色显示	透明→白浊
ECB 型	电控双折射的光干涉	Nn、Np	沿面→垂面、垂面→沿面、混合→垂面	2 片	电控多色显示	电控多种干涉色显示
GH 型	电控二色性染料	Np＋D Ch＋D	沿面→垂面或垂面→沿面	1 片或无	彩色显示	颜色浓度的变化或散射
FLC 型(SSFLC)	光干涉	SmC	沿面平行→沿面平行	2 片	高速响应及存储	黑白对比
PDLC 型(PSCT)	光散射	Ch＋聚合物网络	液晶畴平面→焦锥→垂直	无	高速响应及存储	散射态→透明
PC 型	光散射	Np＋Ch Nn＋Ch	沿面(垂面)→焦锥、焦锥→垂面	无	有存储	透明→白浊 白浊→透明
热光型	光散射	SmA、Ch、Nn 聚合物	垂面(沿面)→集锥(沿面)→焦锥	无	存储性能激光写入	透明→散射

续表

工作模式	原理	液晶类型	分子排列变化	偏振片	显示特性	显示状态
TN 型	电控旋光	Np	沿面扭曲→垂直排列	2 片	无存储、可有源化	透过率变化→对比度变化
STN 型（SBE 型）	光干涉	Np	沿面扭曲 180°～270°→垂面	2 片	黄蓝或黑白模式，多路驱动好	黄蓝对比或黑白对比

注：Np 代表正性向列相液晶；Nn 代表负性向列相液晶；Ch 代表胆甾相液晶；D 代表二色性染料；SmC 代表近晶 C 相液晶；SmA 代表近晶 A 相液晶；DS 型代表动态散射型；ECB 代表电控双折射型；GH 代表宾主效应型；FLC 代表铁电效应型；SSFLC 代表表面稳定铁电效应型；PDLC 代表聚合物分散型；PSCT 代表聚合物促使稳定的胆甾相液晶织构；PC 代表相变型；TN 代表超扭曲向列相型；STN 代表超扭曲向列相型；SBE 代表超扭曲双折射型。

本章小结

液晶显示技术发展迅猛，已经成为当今时代的主流显示。液晶材料在某个温度范围内具有晶体的各向异性和液体的流动性，具有特殊的物理性质和电光效应，利用这些性质人们制作出各种显示器，应用到生产和生活的各个角落。本章从液晶材料开始，讲述了液晶显示器的显示原理。

1. 液晶的种类

根据产生液晶态的物理条件，液晶可以分为热致液晶和溶致液晶两大类。根据刚性中心部分的形状，液晶可以分为细长棒状和扁平盘状两种。显示方面用到的液晶材料主要是细长棒状的热致液晶。根据液晶相，棒状液晶又分为向列相、近晶相、胆甾相。向列相液晶具有明显的电学、光学各向异性，加上黏度较小，成为液晶显示器中应用最为广泛的一类液晶。

2. 液晶的物理性质

液晶的物理性质直接影响显示器的各种性能参数。液晶介电各向异性是指液晶在不同方向上的介电常数不同，是决定液晶分子受电场影响程度的主要参数。液晶在不同方向上的折射率也不同，具有光学各向异性。液晶通常情况下电导率很低，且在平行分子长轴与垂直分子轴方向的电导率分量不同，具有电导各向异性。液晶分子弹性形变影响液晶显示的阈值电压和响应时间。

3. 液晶的电光效应

液晶的电光效应是指液晶在外电场下分子的排列状态发生变化，引起液晶屏的光学性质发生变化的一种电光调制效应。动态散射效应是一种电流型器件，是最早应用于显示技术的效应。电控双折射效应通过施加电场利用液晶分子的高度双折射性，控制液晶屏内分子倾斜程度的效应。宾主效应是将二色染料作为客体(宾体)溶于特定排列的向列相液晶材料(主体)中，利用染料分子不同的吸收实现彩色显示的效应。除此之外还有铁电效应、聚

合物分散型、扭曲和超扭曲向列相效应等电光效应，其中扭曲向列相效应是应用最多最广的电光效应。

4. TN 模式的显示原理

TN 型液晶显示器分为常白模式和常黑模式两种。常白模式液晶显示器的上下两个偏振片透光的光轴垂直，内部液晶分子从上到下刚好扭曲 90°。不外加电压时，液晶显示器为透光状态，为亮态；加上外界电场后，随电场的增加透过的光强逐渐减小，最后透光率趋近于零，为暗态，可以实现在白色背景上显示黑色图案。常黑模式刚好相反。

5. STN 模式的显示原理

STN 型液晶显示器基板表面的液晶分子与偏振片光轴方向不同。入射光侧液晶分子长轴方向与上偏振片的光轴旋转 30°(β)，而出射光侧的液晶分子长轴方向与下偏振片的光轴旋转 60°(γ)。在液晶中由于传播速度的不同，光通过下偏振片时相互发生干涉。不加电压时，在液晶分子旋光和光的双折射共同作用下透光，呈现黄色；加上一定的电压，液晶分子沿电场方向排列，从上偏振片透过的光，穿过液晶分子后到下偏振片，由于与下偏振片光轴垂直，不透光，呈现黑色。因此，STN 型显示本身能显示颜色。

本章习题

一、填空题

1. 由棒状分子形成的液晶，其液晶相共有三大类：__________、__________和__________。

2. 常黑型 LCD，无外加电压时，照射光被遮断，此时是“黑”，而有外加电压时，照射光能通过，此时是“白”，那么，它的上下偏振片轴方向是__________。

3. TN-LCD 是 Twist Nematic Liquid Crystal Display 的简称，即__________液晶显示器。

4. 从组成和产生液晶态的物理条件看，液晶可以分为__________和__________两大类。

5. STN LCD 的当偏振片粘贴在注入液晶的液晶盒的上下玻璃基板上，并上下偏振片光轴垂直时，β 为 30°左右、γ 为 60°，不加电压时，显示__________色，加电压后为__________色，这种是__________模式。

6. 目前用于显示的液晶材料基本上都是__________。

7. 扭曲角在 180°～270°之间，主要用于各种仪器仪表、汉显机、记事本、笔记本计算机等的液晶显示器件是__________。

8. __________年奥地利植物学家莱尼茨尔(F. Reintzer)发现液晶。

9. 液晶是具有液体的流动性和__________的双折射性的合二为一的物质。

10. 液晶的电光效应有__________、__________、__________，还有铁电效应、聚合物分散型、扭曲和超扭曲向列相效应等电光效应，其中__________是应用最多最广的电光效应。



二、判断题

1. 在液晶盒内液晶分子，不管是否加电压，都是沿着PI摩擦的沟槽排列的。（　　）
2. 液晶材料在液晶温度范围以下的低温变成液体；反之，在高温，变成固体。（　　）
3. 在TN LCD的模块中要将驱动电路的电场信号施加到ITO电极上，才能实现显示。（　　）
4. 液晶通常是液态是由于温度上升到清亮点而成为透明的固态。（　　）
5. 液晶是介晶相的一种。（　　）
6. 向列相液晶是应用最为广泛的一类液晶材料。（　　）
7. 最早发现的液晶材料是向列相液晶。（　　）
8. TN型液晶显示器不需要偏振片也可以正常显示。（　　）
9. 当前主流的TFT液晶显示器也是一种扭曲向列相效应的液晶显示器。（　　）
10. 铁电液晶是近晶相液晶材料的一种。（　　）

三、名词解释

液晶、热致液晶、残像、闪烁、液晶介电各向异性、p型液晶、n型液晶、液晶的电光效应、宾主效应、无源矩阵液晶显示器、有源矩阵液晶显示器、常白型液晶显示器、常黑型液晶显示器

四、简答题

1. 简述液晶的种类。
2. 简述TN型液晶显示器的显示原理。
3. 简述液晶相的分类。
4. 简述向列相液晶的特点。
5. 简述液晶显示器残像产生的原因。
6. 简述液晶显示器闪烁形成的原因。
7. 简述液晶材料的物理性质对显示性能的影响。
8. 描述第一个液晶显示器采用的显示原理(动态散射效应)。
9. 简述偏振片的作用。
10. 简述液晶显示器的分类及英文缩写。
11. 简述STN型液晶显示器的显示原理。
12. 简述铁电液晶的工作原理。

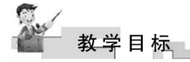
五、思考题

1. 画出TN-LCD的结构图，简述TN型液晶显示器的组成并在图中标出各部分的名称。
2. 画出常白型TN液晶显示器的显示原理图，并简述显示原理。
3. 不同种类的液晶材料是不是都能应用到显示中？在各种类型的显示中，液晶材料是不是可以互换？请举一个例子分析为什么。

第3章

液晶显示器的广视角技术

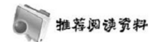
液晶显示器本身不能发光，利用背光源的光，通过偏振片、取向层、液晶层后，控制输出的光线的方向性。并利用电场改变液晶分子的排列方式，从而改变光的透光率实现不同画面的显示。由于液晶分子扭曲的角度不同以及材料的各向异性，从不同的角度观看会有不同的色彩和亮度，存在视角的问题。这一直是液晶显示器中及其重要的问题，需要大力开发广视角技术。通过本章的学习，可以清楚地知道视角的定义，视角产生的原因，当前有哪些广视角技术，各种广视角技术有什么特点。



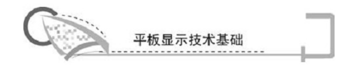
- 了解视角的定义及视角的表示方法；
- 了解视角产生的原因及 TN 型液晶显示器的视角状况；
- 掌握广视角技术种类；
- 了解广视角技术的工艺方案；
- 掌握广视角技术的显示原理。



知识要点	能力要求	相关知识
视角的定义	(1) 掌握视角的定义及表示方法 (2) 了解视角产生的原因	光在晶体中传播的性质
广视角技术种类	(1) 了解广视角技术的种类及定义 (2) 了解各种广视角技术的代表厂商	液晶显示器的性能参数
广视角技术的器件结构	(1) 了解各种广视角技术的特点和作用 (2) 掌握广视角技术的器件结构 (3) 了解各种广视角技术的工艺方案	薄膜晶体管的阵列工艺
广视角技术的显示原理	(1) 了解各种广视角技术的差别 (2) 掌握广视角技术的显示原理	TN 型液晶显示器显示原理



[1] 技术在线 http：//china. nikkeibp. com. cn/.
[2] 中华液晶网 http：//www. fpdisplay. com/.
[3] 维基百科 http：//en. wikipedia. org/.

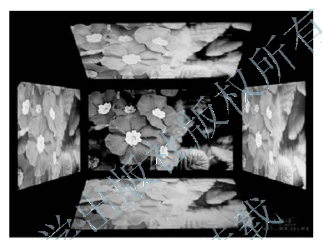



基本概念

可视角度：是指液晶显示器可以清楚看到不失真影像的视线与屏幕法线的角度，数值越大越好，简称为视角。


引例：视角的问题

以一种液晶电视为例，说明视角的问题。该液晶显示器采用的是TN型液晶显示器，与大部分TN型液晶显示器的可视角度类似。在大角度观看时会出现明显的色彩衰减现象，特别是从下往上观看或者从上往下观看，颜色的衰减尤为明显，如图3.1(a)所示。并且上下边框处存在较为微弱的漏光现象，如图3.1(b)所示。


(a) 色彩衰减现象



(b) 漏光现象

图3.1 视角的问题(ZOL.com.cn)


资讯：广视角技术的应用

据DisplaySearch统计，2008年液晶电视面板采用VA广视角技术的比重达70%，采用IPS广视角技





术的比重为24%，而采用TN加补偿膜技术的则为6%。到2012年，采用IPS(含FFS)广视角技术的液晶电视面板比重增加到28%，采用VA技术的产品比重下降到65%。苹果公司的第四代iPhone及iPad也可能采用的是先进的FFS(AFFS)广视角技术。由此可见，广视角技术已开始广泛应用。

3.1 视角产生的原因

液晶显示器从不同的方向上观察，显示屏的对比度是不同的，这种视觉上的差异特性称为视角特性。把可以清楚看到不失真影像的视线与屏幕法线的角度定义为视角。衡量画面不失真的参数有：对比度、色差和灰阶逆转。其中对比度是最常用的衡量参数。

对比度(Contrast Ratio，CR)是指随着观看角度的增加，显示器上出现对比度锐减的现象，如黑色变成了白色，或者白色变成了黑色。正中心的对比度最大，从中心向边缘对比度下降，一般下降到10∶1，即$CR>10$的角度为最大可视角度。就是说在对比度10以下，画面开始明显失真，视觉效果非常差。还有的厂商标注$CR\geqslant5$为最大可视角度。

色差是指随着观看角度的增加，液晶显示器上出现颜色锐变的现象，当这种变化超过一个无法接受的值的时候为最大可视角度。

灰阶逆转是指随着观看角度的增加，液晶显示器上出现低灰阶比高灰阶还要亮的现象，产生逆转的临界点时的观看角度为最大可视角度。

3.1.1 视角的表示方法

观察者在平行于显示器的正前方看，屏幕正中心法线方向的视角最好，对比度高，能达到600∶1。然而，偏离了法线方向对比度开始下降，亮度也随着不同的观察角度变化而变化。第一台笔记本电脑的液晶显示器视角问题明显，从不同的角度观看具有不同的灰度级，甚至彩色效果也随视角变化。

视角可分为水平视角和垂直视角。水平视角是指以液晶显示屏的屏幕法线方向为中心，向左和向右移动可以清楚看到影像的角度范围，又称为左右视角。垂直视角是指以液晶显示屏的屏幕法线方向为中心，向上和向下移动可以清楚看到影像的角度范围，又称为上下视角，如图3.2所示。阴影部分为画面失真区域。一般液晶显示器的左右视角是对称的，上下视角不一定对称，常常是上下视角小于左右视角。

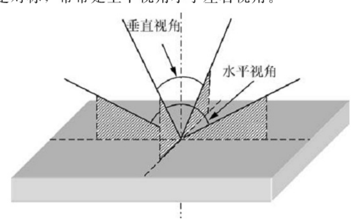


图3.2 水平视角和垂直视角



视角以“度”为单位，用左视角和右视角度数的总和表示水平视角，用上视角和下视角度数的总和表示垂直视角；也可以分别用左、右、上、下视角的度数表示。一般规定液晶显示器的最低视角为120°/100°，低于这个值消费者是不能接受的。120°/100°是指水平视角为120°，垂直视角为100°。相当于左、右视角分别为60°左右，上、下视角分别为50°左右，在这个区域内可以清晰地看见屏幕图像画面不失真。当前，最好的视角能达到176°/176°。视角越大，可视区域越大，液晶显示器越适用。

视角用方位角图来表示，如图3.3所示。方位角图外面标注的0°、45°、90°等，表示观察者在液晶屏的左、右、上、下不同方向。方位角图内部的同心圆上标注的10°、20°、30°、40°、50°、60°表示视角的大小。方位角图的颜色变化表示对比度的大小，如颜色深是对比度高处，颜色浅处是对比度低处，相同颜色面积区为对比度一样。

以对比度为10∶1($CR=10$)为例，说明方位图表示的视角大小。$CR=10$是浅灰色部分，与从上下左右方位观察线相交点位于同心圆的位置坐标读出视角数值。在方位角图中可以看到上视角约为30°，下视角约为12°，左视角为50°，右视角为50°。

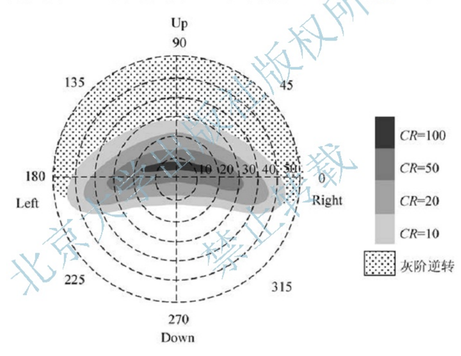


图3.3 表示视角的方位图

3.1.2 TN型液晶显示器的视角特性

从液晶显示器的种类中可知，TFT LCD是一种有源矩阵液晶显示器，在液晶显示原理上也是一种TN型的液晶显示器。视角有限使得显示性能上略为逊色，但价格便宜、成本低廉，大多厂商制作的产品多数是TN型TFT LCD产品。

TN型液晶显示器的视角特性是：①呈现不对称性，左右视角大，上下视角小；②视角较窄，在对比度$CR=10$下，左、右视角约为50°，上视角约为20°，下视角约为30°；③存在灰阶逆转现象，就是在视角外更大的范围观看，显示黑色时容易出现斜入射漏光现象。

3.1.3 视角产生的原因

TN型液晶显示器有两种模式：一种是常黑模式，不加电压亮度最低，可以实现在黑色背景下显示白色图像；一种是常白模式，不加电压亮度最亮，可以实现在白色背景下显示黑色图像。常白模式的TN型液晶显示器工艺简单、容易实现纯黑色，比较常用。因此，以常白模式的TN型液晶显示器为例，来说明视角产生的原因。

1. 被动发光

液晶显示器本身不能发光，在背光源光的照射下，通过电场对光进行调制实现显示，是一种被动发光显示器。外界环境的光，在液晶显示器经表面处理后，对液晶显示器的对比度和色彩影响不大。但背光源紧密贴在液晶显示器的背面，发射的光直接照射到贴有偏振片的液晶屏上。斜入射光，液晶屏不能很好遮断。在液晶屏内部产生了很多杂乱的光线，对正常显示的光线产生干扰。从某一个角度观看液晶显示屏时，这些杂乱的光线会由于液晶分子的折射或其他原因进入人的眼睛，造成画面失真。

2. 液晶的光学性质

液晶显示器中使用最多的液晶材料是一种长条棒状的向列相液晶，具有和晶体类似的双折射现象。光线进入液晶屏内，将分成非寻常光(e)和寻常光(o)。双折射率Δn是两束光折射率的差，$\Delta n=n_e-n_o$，正性液晶的$\Delta n>0$。入射光沿液晶分子长轴方向传播时不发生双折射，只有寻常光传播，没有光程差。当入射光与液晶分子长轴方向有一定角度时会发生双折射，入射光倾向于偏向液晶分子长轴的方向，光程差为$\Delta n \cdot d$。

3. 不同方向看到的灰阶不同

TN型液晶显示器的取向层为平行取向，上下基板摩擦方向垂直，液晶分子从上到下扭曲90°。不加电压时，入射的偏振光与液晶分子长轴方向有一定夹角，倾向于偏向液晶分子长轴的方向，光通过液晶层刚好扭曲了90°，出射的线偏振光平行于下偏振片的光轴，透光，为白态。加电压时，液晶分子沿电场方向排列，入射光沿光轴方向传播，不发生双折射，通过液晶层，刚好与下偏振片光轴垂直，不透光，为黑态。

当显示不同灰阶施加不同的电压时，液晶分子的长轴方向与玻璃基板有不同的角度。以如图3.4所示电压下液晶分子排列为例，说明不同方向看到的灰阶不同。观察者在不同的方向观看时，有的看到液晶分子的长轴，有的看到液晶分子的短轴。不同角度观察时，出射光的光程差$\Delta n \cdot d$存在很大差异。光程差不同，光的偏振状态不同，表现出光学各向异性，检偏后透过率不同看到的亮度不一样。由此，导致TN型液晶显示器的视角特性较差，只能在较小的视角范围内实现正常的显示功能，如图3.4所示。

观察者在Ⅱ的位置，显示屏的正中间，看到正常的中灰阶画面；观察者在Ⅰ的位置，看到液晶分子的短轴方向。相当于常白模式在正中间观看下，加大电场液晶分子垂直基板排列的状态，看到的是黑态，为低灰阶；观察者在Ⅲ的位置，看到液晶分子的长轴方向。相当于常白模式在正中间观看下，不加电场液晶分子扭曲后平行基板排列的状态，看到的是白态，为高灰阶；同样，在中间的其他角度观看时，会观察到相应的不同的灰阶。

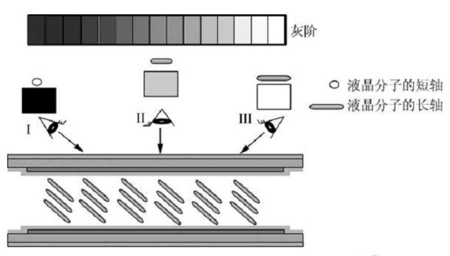


图 3.4　不同角度观看的灰阶不同

4. 漏光产生的原因

漏光是黑色显示时有不同程度的光透过的现象。常黑模式 TN 型液晶显示器不加电压下为黑态。入射的线偏振光在扭曲的液晶分子作用下产生双折射，导致通过液晶层的偏振光的光程差 $\Delta n \cdot d$ 不同，引起不同程度的漏光，无法得到全黑色。要形成均匀的全黑色背景，减少漏光，液晶屏的盒厚必须做得较厚。盒厚变厚又会造成响应时间变长。由此，在实际应用中 TN 型液晶显示器很少采用常黑模式。

常白模式的 TN 型液晶显示器也会产生漏光现象。常白模式的 TN 型液晶显示器加电压后液晶分子平行于电场、垂直于基板排列，显示黑态。垂直方向入射的光经过平行电场排列的液晶分子，入射光沿液晶分子长轴方向传播，不发生双折射现象，不存在光学延迟 $\Delta n \cdot d$ 的差别，没有漏光，可以得到比较纯正的黑色。当入射的偏振光偏离了垂直方向入射，与液晶分子长轴方向成 θ 角时，会有不同程度的漏光。在液晶屏内入射光发生双折射现象，形成非寻常光和寻常光，光程差为 $\Delta n \cdot d$，Δn 是液晶分子的双折射率，d 是液晶屏的盒厚。两束光的相延迟为：

$$\delta = \frac{2\pi \Delta n d}{\lambda} \tag{3.1}$$

式中，λ 为入射光波长。透光率为：

$$T = T_0 \sin^2(2\theta)\sin^2(\pi \Delta n d/\lambda) = T_0 \sin^2(2\theta)\sin^2(\delta/2) \tag{3.2}$$

式中，T_0 为光全部透过时的透光率；θ 代表液晶分子长轴与入射光的夹角。当 $\theta = 0$ 时，透光率 $T=0$，呈现黑态。当夹角 $\theta \neq 0$ 时，双折射产生的相位延迟使得入射的线偏振光变成椭圆偏振光，不能完全被第二个偏振片所阻止，会有一定的光透过，$T>0$，产生漏光，如图 3.5 所示。



小提示：垂直入射和偏离垂直方向入射会同时存在

液晶显示器背光源属于面光源，在正上方观看时是垂直入射；但是在斜上方观看时，是偏离了垂直方向入射，因此垂直入射和偏离垂直方向入射会同时存在于液晶显示器中。

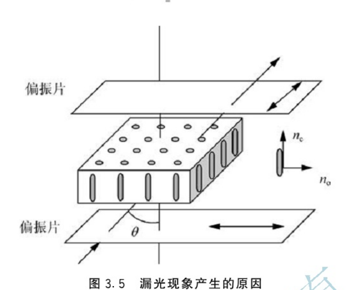


图 3.5 漏光现象产生的原因

5. 灰阶逆转现象

常白模式的 TN 型液晶显示器，加电压下液晶分子垂直基板排列为黑态，显示为低灰阶的画面。但是由于偏离了垂直方向入射的光，造成某个角度漏光的现象，透过率增加。有时候看上去亮度比旁边高灰阶的画面亮度还要高，出现灰阶逆转现象。

3.1.4 改善 TN 型液晶显示器视角的方法

1. 上下基板取向层 45°摩擦

在实际应用中，一般要求水平视角比较宽，垂直视角比较窄。根据式(3.2)可知，当 $\theta=\pi/4$ 时，可以获得最大的透光率。因此，上下基板取向层的摩擦方向为 45°，而不是顺着玻璃的边缘方向摩擦，同样上偏振片和下偏振片光轴方向也取 45°。在不加电压的情况下中间的液晶分子和观察者近似于平行，如图 3.6 所示，在(4)、(5)位置时可以获得比较大的水平视角。

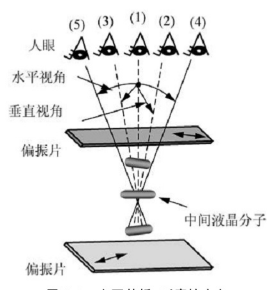


图 3.6 上下基板 45°摩擦方向

2. 改变背光源的结构

大屏幕显示应用中视角现象尤为明显。大屏幕液晶显示的背光源主要采用冷阴极荧光灯。为防止斜入射的现象，在背光模组中采用一纵一横的两块棱镜板来聚光，把面光源转成线光源再汇聚成点光源直接射入液晶盒，如图 3.7 所示。这种准直入射的背光源增加了正面亮度对提高对比度和宽视角很有帮助。

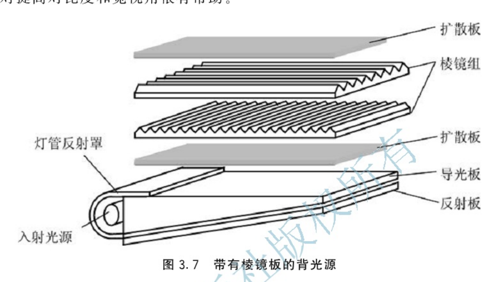


图 3.7　带有棱镜板的背光源

3. 多畴 TN 模式

多畴技术(Multi Domain)按区域数量可以分为两畴或四畴 TN 模式。两畴是把每个像素自然分成两个子像素，液晶分子在两个子像素中具有相反方向的倾角，如图 3.8 所示，透光率对观看角度的依赖性降低了，从而改善了视角特性。四畴是把每个像素自然分成 4 个子像素，液晶分子在 4 个子像素中具有不同方向的倾角。

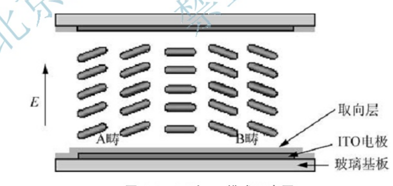


图 3.8　两畴 TN 模式示意图

3.1.5　STN 型液晶显示器的视角

TN 型和 STN 型液晶显示器的显示原理不同，视角也不同。TN 型对偏振光有旋光作用，入射光的偏振方向射入液晶屏从上到下旋转了 90°。STN 型显示基于双折射原理，射出的寻常光和非寻常光由于相位不同，相互干涉呈现一定颜色。扭曲角不同，液晶屏的颜色也不同。当扭曲角为 240°时，呈现黄绿色，左右视角和上下视角约为 40°和 40°。扭曲角增大，视角特性变得更好。

3.2　广视角技术简介

3.2.1　广视角技术的重要性

液晶显示器近年来飞速发展，在亮度、对比度、分辨率、最大颜色还原数等性能指标都得到了显著提高，但是要使得液晶显示器得到更广泛的应用，还需迫切解决液晶显示器的响应时间过长及可视角度过窄的问题。

液晶显示器主流产品的响应时间是16～30ms。随着显示技术的更新，响应时间在逐渐减小，当前已经有低于8ms的液晶显示器，消费者基本可以接受。在广泛应用中视角问题变得特别重要。

在可旋转的液晶显示器中，垂直视角在旋转中变成了水平视角。那些垂直视角低的TN型液晶显示器，消费者在稍微转动后的水平方向看画面就会明显地失真。所以，只有基于广视角技术的液晶显示器才能真正应用到旋转应用中。

在大屏幕的液晶显示器中，中、远距离观看，或者多人同时观看时，视角问题就会变得尤为突出。只有基于广视角技术才能保证液晶显示器在不同角度看到的画面一样。

在固定距离的高端应用中，低视角的液晶显示器的应用也受到限制。任何消费者都不会希望在某一个固定距离观看屏幕时，出现屏幕中间和平面边缘不一样的对比度或者色彩的差异。屏幕越大，中心与边缘的视角差别越大，问题越明显。

由此可见，要使液晶显示器能够获得广泛的应用，解决视角问题迫在眉睫。

3.2.2　广视角技术简介

视角特性的改善一直是液晶显示器件研究开发人员追求的重要目标之一。到目前为止比较流行的改善液晶显示器视角的方法有：膜补偿(TN＋Film)、MVA技术、IPS技术、FFS技术等。当前市场主流的有源矩阵液晶显示器(TFT LCD)的显示原理中，除了一些中端的面板产品采用TN型TFT LCD外，多数广泛采用了各种广视角技术，见表3-1。由于采用的广视角技术不同，各自所采用的液晶材料和显示器结构不同，优缺点也不尽相同。

表3-1　广视角技术的种类及代表公司

公司	广视角技术	
富士通、友达、奇美、夏普	多畴垂直排列技术	MVA，Multi-domain Vertical Alignment
三星、索尼	图案化垂直排列技术	PVA，Patterned Vertical Alignment
日立、LG、松下、飞利浦	共面转换技术	IPS，In-Plane Switch
现代、三星、京东方	边缘场开关模式	FFS，Fringe Field Switching
日本松下	光学补偿双折射技术	OCB，Optical Compensated Birefringence
夏普	先进的广视角技术	ASV，Advanced Super-View



小提示：当前液晶显示器的视角

15 寸液晶显示器的水平视角在 120°以上，左右对称。垂直视角要比水平视角小得多，在 100°左右，上下不对称。高端的液晶显示器采用广视角技术后已经可以做到水平和垂直都在 170°以上。采用 FFS 技术后，各项参数都达到了前所未有的高度，最大视角可达到 180°。

3.3 膜补偿技术

3.3.1 膜补偿技术的简介

膜补偿技术(TN+Film)是在原有 TN 模式的基础上，在液晶屏外部粘贴一些各向异性的光学膜，以补偿由于液晶分子的状态不同而产生的光学性质差异来改善视角的。该技术是一种简单易行、廉价的方法，广泛应用于各种模式的液晶显示器中。大多数台湾厂商都使用补偿膜技术制作 15 寸液晶显示器。

根据液晶显示器模式及液晶材料光学特性的不同，采用的补偿膜有正性补偿膜和负性补偿膜两种。正性补偿膜用于补偿负性双折射率的 TN 型液晶显示器，常用高分子薄膜沿某一方向单轴拉伸的方法制备。正性补偿膜的高分子材料主要有聚乙烯醇(PVA)、聚碳酸酯(PC)、聚甲基丙烯酸酯(PMMS)、聚醚砜(PES)，以及其他聚酯材料等。

负性补偿膜用于补偿正性双折射率的 TN 型液晶显示器，特别是应用在常白模式的 TN 型液晶显示器。负性补偿膜常采用无极分子多层膜复合和用溶液浇注刚性高分子聚酰亚胺膜的方法制备。

3.3.2 补偿膜应具备的条件

1. 双折射率要匹配

补偿膜双折射率 Δn 的变化要与补偿的液晶显示器中液晶分子的 Δn 变化在整个波段范围内相匹配。也就是说，在可见光范围内，寻常光和非寻常光在液晶屏内与补偿膜内总的相位差应为零或接近于零。液晶屏的相位差为 δ_1，补偿膜的相位差为 δ_2，那么应该满足：

$$\delta=\delta_1+\delta_2=0 \quad \text{或} \quad \delta=\delta_1+\delta_2\to 0 \tag{3.3}$$

根据式(3.1)，液晶屏和补偿膜的相位差分别为：

$$\delta_1=\frac{2\pi\Delta n_1 d_1}{\lambda} \qquad \delta_2=\frac{2\pi\Delta n_2 d_2}{\lambda} \tag{3.4}$$

式中，λ 为入射光波长；Δn_1 和 Δn_2 分别为液晶屏和补偿膜的双折射率；d_1 和 d_2 分别为液晶屏的盒厚和补偿膜的厚度。$\Delta n_1 d_1$ 和 $\Delta n_2 d_2$ 分别代表液晶屏和补偿膜的光程差。要满足相位差为零或接近零，应该有：

$$\Delta n_1 d_1+\Delta n_2 d_2=0 \tag{3.5}$$

因此，正性双折射率的液晶材料 $\Delta n_1>0$，要采用负性双折射率的补偿膜 $\Delta n_2<0$；而负性双折射率的液晶材料 $\Delta n_1<0$，要采用正性双折射率的补偿膜 $\Delta n_2>0$，实现双折射率的匹配。

2. 其他条件

（1）补偿膜的透光率要高，为避免补偿膜对背光源的光吸收损耗，补偿膜在可见光范围内要具有较高的透光率。

（2）补偿膜的光程差 Δnd 应在 $1/8\lambda$ 与 λ 之间。

（3）补偿膜与基底的折射率相近以减少光在两者之间的反射与散射。

3.3.3　负性补偿膜原理

负性膜补偿利用负性补偿膜来补偿液晶显示器黑态的相位差，减少黑态时由于斜入射双折射现象产生的漏光。该补偿膜技术可以将可视角度增加到150°左右，但不能改善对比度和响应时间等性能。

负性膜补偿是基于 TN 型液晶显示器的改进技术，液晶分子的排列还是 TN 模式。在加电压下，正性液晶分子在电场下垂直基板表面排列为黑态，偏离垂直入射的光容易产生漏光，采用负性补偿膜来进行相位补偿，降低黑态下漏光实现更宽的可视角度，原理如图 3.9 所示。

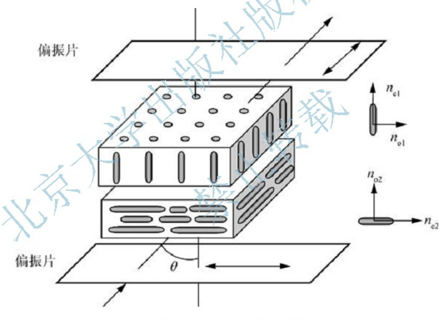


图 3.9　负补偿膜的补偿原理

当背光源的光线经过下方偏振片，再穿过透明的补偿薄膜后便有了负的相位延迟，$\Delta n_2 < 0$。进入液晶屏之后由于液晶分子 $\Delta n_1 > 0$ 的作用，到上偏振片后总相位差为零或接近为零，使光恢复到原来的偏振状态。负性补偿膜补偿了液晶屏内由于入射光斜射造成的双折射产生的椭圆偏振光，保持原来的线偏振状态，到上偏振片正好被第二块偏振片阻止不能透光，减少了黑态下漏光，提高视角。

3.3.4　双面补偿膜原理

要实现良好的可视角度，需要合理地设计液晶显示器的模式和精密的视角补偿膜。采用双向补偿膜技术可以获得更佳的补偿效果。



双面补偿膜技术在液晶屏的两侧贴上补偿膜，外面再贴上偏振片，如图 3.10 所示。当下偏振片透光的偏振光经过下补偿薄膜后，便有了负的相位延迟，进入液晶屏之后由于液晶分子的作用，到液晶屏中间时，负相位延迟被正相位延迟抵消为 0。当光线继续向上进行，受到液晶屏上部分液晶分子的作用，经过液晶屏的时候，又有了负的相位延迟。当光线穿过上层补偿薄膜后，相位延迟刚好又被抵消为 0。这样精确地采用双补偿膜，配合 TN 模式液晶可以取得很好地改善视角的效果，如图 3.11 所示。

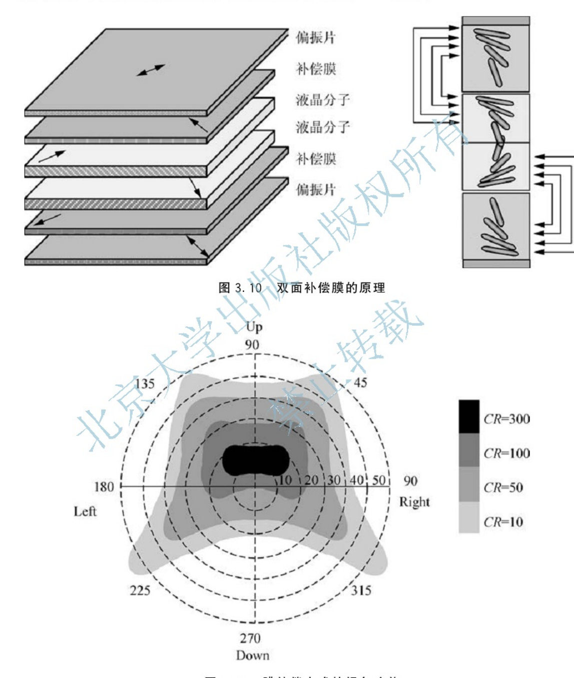


图 3.10 双面补偿膜的原理

图 3.11 膜补偿方式的视角改善

当前多数产品将视角补偿膜与偏光片粘贴在一起，如图 3.12 所示。在偏振片中，通过对 TN 型液晶显示器在暗态下的 $\Delta n \cdot d$ 进行补偿，可以很好地改善显示器的视角特性。



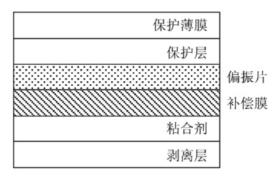


图 3.12 补偿膜与偏振片一体的结构

3.3.5 膜补偿技术的特点

1. 成本低、技术简单

膜补偿技术仍然基于传统的TN模式，只是在制屏工艺中增加一道贴膜工艺，生产工艺改变不大，可以沿用现有的生产线，不会造成成品率下降，生产成本低，产品价格低廉，技术门槛低，应用广泛。

2. 亮点较多

膜补偿技术的缺点是仍然存在原有的亮点问题，不会从补偿原理上减少缺陷。一般TN模式液晶显示器都属于常白模式，不加电压时，呈亮态；在加电压后，呈黑态。由于制作和工艺等各种因素，某些像素上的薄膜晶体管损坏时，电压就无法加到像素电极上，像素上的液晶分子不能够按照相应的信号电压进行旋转。在任何情况下，光线都会穿透液晶屏两端的偏振片，该像素永远处于亮态。膜补偿技术是在液晶屏的外面贴上补偿膜，对显示内部固有的缺陷没有改变。

3. 视角提高幅度有限

膜补偿技术有效地提高了视角，但由于补偿膜固定贴在液晶屏上，不能对任意灰阶、任意观察角度进行补偿，所以膜补偿技术提高视角的幅度有限。TN模式的液晶显示器所固有的灰阶逆转现象依旧存在。因此，膜补偿技术只是一种过渡性质的广视角技术。

3.4 MVA技术的显示原理

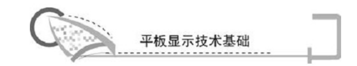
垂直取向(Vertical Alignment)技术，缩写为VA技术。VA型TFT LCD在目前的显示器产品中应用较为广泛，最为明显的技术特点是在8bit面板上可实现16.7M色彩和大视角。目前VA技术有两种，一种为MVA技术，另一种为PVA技术。



VA技术的应用

VA技术最早是由富士通公司在1996年开发的。VA面板的正面对比度高；响应时间比较快，一般灰阶为6ms左右；成本低。市场上消费级的24英寸广视角液晶显示器大部分都是VA面板，代表性的是友达/奇美光电的MVA技术和三星的S-PVA，如图3.13所示。





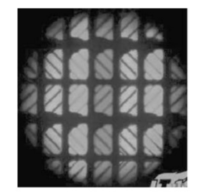
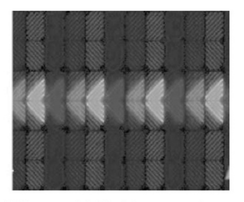



图 3.13　友达的 MVA(左)和三星的 S-PVA(右)技术(WXIU.com)

3.4.1　VA 技术的特点

1. 用凸起物改善液晶分子长轴的变化幅度

TN 型液晶显示器视角狭窄。液晶分子在电场下运动时长轴方向变化大，让观察者看到的液晶分子长轴在屏幕上的“投影”长短有明显差距。在某些角度看到的是液晶分子长轴，某些角度看到的是液晶分子短轴。垂直取向的 VA 技术改善了液晶分子长轴变化的幅度。不加电压时垂直于基板表面排列以及垂直于凸起物排列。加电压时更倾向于平行基板排列，液晶分子长轴变化的幅度不大，如图 3.14 所示。屋脊状凸起物(Protrusion)使液晶本身产生一个预倾角。凸起物顶角的角度越大，液晶分子长轴的倾斜度就越小。

2. 可以实现光学补偿

VA 型液晶显示器是一种双畴取向技术。上下偏振片光轴方向垂直，内部充入 n 型液晶，表面取向层垂直取向。不加电压时，液晶分子长轴垂直于基板表面，只有在凸起物附近的液晶分子略有倾斜，光线无法同时穿过上下两片偏光板，如图 3.14(a)所示。在双畴模式中左右相邻的畴(A、B)，分子状态正好对称。

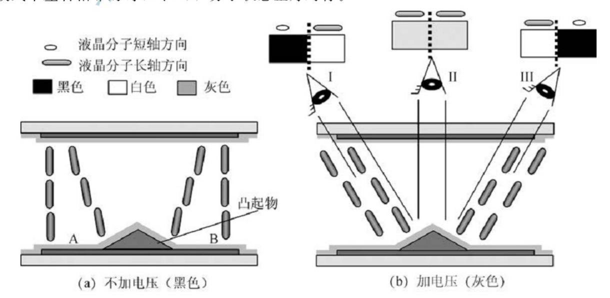


图 3.14　VA 型改善了液晶分子长轴变化的幅度



当加电压后，凸起物附近的液晶分子，迅速带动其他液晶旋转到垂直于凸起物表面状态。液晶分子长轴方向更倾向于平行基板排列，透射率上升从而实现调制光线。A 和 B 畴的左右相邻的液晶分子长轴方向分别指向不同的方向，分子状态对称，如图 3.14(b)所示。利用这种不同指向的液晶分子长轴方向来实现光学补偿。在方位Ⅱ处观看，不加电压和施加电压后，看到的都是倾斜的液晶分子，在屏幕的投影都是接近液晶分子长轴方向，显示中灰阶；在方位Ⅱ和Ⅲ处观看，不加电压，在屏幕的投影是短轴方向，不透光显示黑色；施加电压后，在屏幕投影是液晶分子长轴方向，透光显示白色。因此，方位Ⅰ和Ⅲ处能同时看到高灰阶和低灰阶，混色后正好是中灰阶。

3.4.2　MVA 技术的器件结构

多畴垂直排列(Multi-Domain Vertical Alignment)技术缩写为 MVA 技术。通常采用取向层掩膜摩擦、光控取向或利用凸起物衬底等方法，在每个像素上形成多个液晶分子取向方向不同的畴，进而改善液晶由于单畴造成的各向异性过强，显示视角特性差的缺点。本节以利用凸起物衬底的方法为例，来说明 MVA 技术的显示器结构及显示原理。



小提示：MVA 技术的发展与应用

MVA 技术最早是由富士通公司在 1998 年开发的，目前台湾奇美和台湾友达获得授权使用此技术。在此技术的基础上，友达开发了 Premium MVA、P-MVA、优质 MVA 技术和 Advanced MVA、A-MVA、先进的 MVA 技术。奇美开发了 Super MVA、超级 MVA 技术。

1. 四畴模式的作用

VA 型液晶显示器的凸起物为直条三角棱状，只分布在上下两块基板的其中一块基板上为双畴模式。MVA 型凸起物为 90°来回曲折的 V 字型三角棱状，同时分布在上下两块基板上，可以巧妙地把液晶分子分成 4 个畴，又称多畴模式的 MVA 型液晶显示器，如图 3.15 所示。

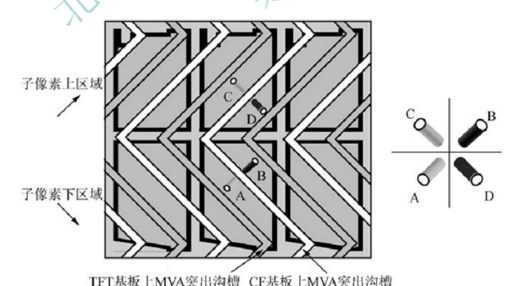


图 3.15　MVA 型液晶显示器的一个单元像素和液晶分子畴的 4 个方向

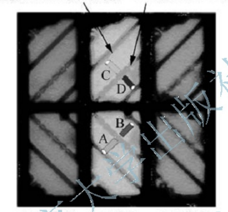


在加电压后，四畴 A、B、C、D 的液晶分子分别朝 4 个方向旋转转动，可以同时补偿液晶显示器的上、下、左、右视角。4 个方向都可以获得不错的视角，还可以更改凸起物的形状，用更多不同方向的液晶畴来补偿视角，效果更好。

彩色显示液晶显示器的每个像素由 R、G、B 3 个子像素组成。而 MVA 型液晶显示器每个子像素根据 V 字形凸起物的方向又分成上下两个区域。每个区域凸起物两侧的液晶分子分别垂直于凸起物排列，如图 3.15(a)所示。因此，相当于每个子像素分成了 4 个液晶分子排列不同的畴，4 个畴的方向为上区域部分的 C、D 方向和下区域部分的 A、B 方向共 4 个方向，如图 3.15(b)所示。

2. 四畴模式的实现

带彩膜的 MVA 型液晶显示器一个像素的照片可以清楚地看到阵列(TFT)基板和彩膜(CF)基板上的 MVA 凸起物，如图 3.16(a)所示。在不同的方向都可以获得非常鲜明的色彩，如图 3.16(b)所示。



(a) 单元像素照片



(b) 不同方向的显示效果

图 3.16　MVA 型液晶显示器的单元像素照片和不同方向的显示效果

实现方法为：①在液晶显示器的阵列基板和彩膜基板上分别光刻制作 V 字形直条三角棱状的凸起物，并且两块基板的 V 字形凸起物交错排列；②两块基板分别涂布上 PI 取向层；③对盒及注入 n 型液晶，内部的 n 型液晶分子采取垂直取向排列，电场下将垂直电场方向排列，凸起物将每个子像素分成了多个可视区域，液晶分子在各自的区域按照各自的方向倾斜排列形成多个畴；④液晶屏的外面设有光学补偿膜。不加光学补偿膜下，MVA 模式对视角的改善仅限上、下、左、右 4 个方向，但其他方位角视角仍然不理想。加上双轴性光学补偿薄膜后，将会得到比较理想的视角。

3.4.3　MVA 技术的显示原理

V 字形直条三角棱状的凸起物把每个子像素分成了 4 个畴，上下基板交错排列。在子像素上区域形成 C 畴和 D 畴；子像素的下区域形成了 A 畴和 B 畴。以子像素下区域的 A 畴和 B 畴为例，说明 MVA 技术的显示原理，如图 3.17 所示，类似于 VA 技术的原理。



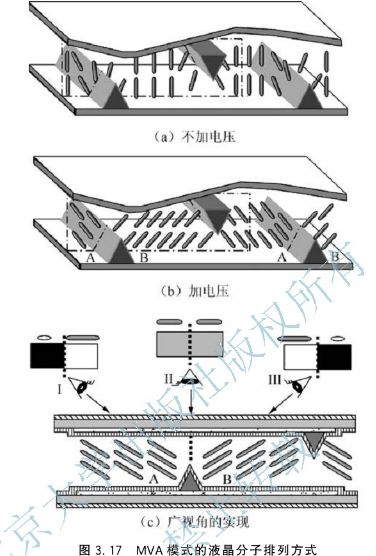


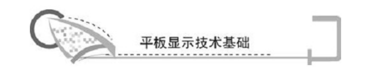
图 3.17　MVA 模式的液晶分子排列方式

不加电压下，液晶分子在液晶屏内并不是全部垂直基板排列。在垂直取向的作用下，一部分垂直于基板排列，一部分垂直于凸起物排列，在交界处液晶分子会偏向某一个角度；上下偏振片与光轴垂直，从一个偏振片通过的偏振光穿过液晶层，到另一个偏振片后与光轴垂直，不透光呈黑态，如图 3.17(a)所示。

当加电压后，n 型液晶分子在电场下要垂直电场排列，但由于垂直取向的作用，使得液晶分子在液晶屏内倾斜排列，并趋向于水平。光可以通过各层，由于双折射产生干涉，透光呈白态，如图 3.17(b)所示。

当加电后，图 3.17(b)虚线框内的 A 畴和 B 畴在视觉观察下的效果如图 3.17(c)所示。与 VA 技术相比，MVA 技术上下基板交错的三角棱状的凸起物共同作用下 A 畴和 B 畴的液晶分子排列更加整齐有序，利用这种不同指向的液晶分子长轴方向来实现光学补偿。

在方位Ⅱ处观察开态和关态，看到的都是接近液晶分子长轴的投影，显示中灰阶；在方位Ⅰ和Ⅲ处观察，关态在屏幕的投影是短轴方向，显示黑色；开态在屏幕投影是液晶分子长轴方向，显示白色。因此，方位Ⅱ和Ⅲ处能同时看到高灰阶和低灰阶，混色后正好是中灰阶。



3.4.4 MVA 技术的工艺方案

采用广视角技术的 MVA 型的 TFT-LCD 的结构和工艺与传统有很多类似，但也有明显的不同。本节将介绍 MVA 技术的不同点，关于传统的 TFT-LCD 工艺将在第 7 章和第 8 章详细地介绍。MVA 型液晶显示器的彩膜和阵列基板上的 MVA 凸起物把每个子像素均匀分成 4 个不同取向的区域实现广视角，不同点就是增加了凸起物工艺。

1. MVA 型 TFT-LCD 阵列的工艺不同

MVA 型 TFT-LCD 阵列的工艺采用 5＋1 次光刻的工艺。5 次光刻同传统的 TFT-LCD 工艺相同，不同的是多了一次光刻，形成 MVA 凸起物的光刻工艺，如图 3.18 所示。

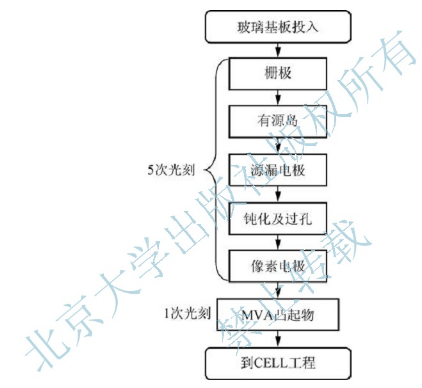


图 3.18 MVA 型 TFT－LCD 阵列的 5＋1 次光刻

MVA 凸起物的光刻工艺包括：①清洗，为避免制作完的薄膜晶体管矩阵受到划伤，清洗的过程，不使用刷洗；②前烘；③MVA 光阻层涂布，采用刮涂（Slit）工艺涂布光阻层，膜厚为 20μm，该刮涂工艺涂布方法在第 8 章会详细地介绍；④后烘；⑤曝光；⑥显影；⑦风刀干燥；⑧坚膜，在高温环境中烘烤基板一定时间使 MVA 膜固化；⑨冷却。由此，形成了 MVA 凸起物的图形。

2. MVA 型 TFT-LCD 彩膜结构的不同

MVA 型 TFT-LCD 的彩膜主要由玻璃基板、黑矩阵（BM）膜、彩色（RGB）膜、保护（OC）膜、透明导电（ITO）膜、隔垫物（PS）、MVA 凸起物七部分组成。与传统的 TFT-LCD 彩膜相比，增加了隔垫物和 MVA 凸起物。图 3.19 为 MVA 型 TFT-LCD 的彩膜结构示意图。隔垫物主要是用来支撑彩膜基板和阵列基板，确保两块基板之间的间隙均匀，提高制屏工艺的成品率的，在第 4 章会详细介绍。

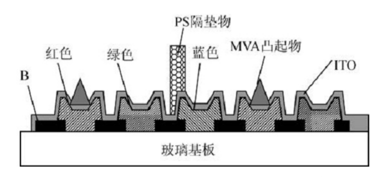


图 3.19　MVA 型 TFT-LCD 的彩膜结构示意图

3.4.5　MVA 技术的特点

在电场作用下液晶分子倾向于水平，背光源的光可以快速地通过，大幅度缩短显示时间；凸起物改变液晶分子取向，可以让视角更为宽广。在对比度大于 10 的情况下，MVA 技术的水平和垂直视角可分别达到—80°和 80°，也就是说上下和左右的总视角分别可以达到 160°，从任何方向都可以看见清晰的画面。

1. 常黑模式

MVA 型的上下偏振片的光轴垂直，在不加电压时显示黑色，为常黑模式液晶显示器。当驱动显示的开关器件 TFT 损坏时，这个子像素永远是暗态，也就是"暗点"，属于液晶显示器的坏点。但相对 TN 型常白模式上常见的"亮点"来说，"暗点"更不容易被发现，对画面影响更小，用户也较容易接受。

2. 响应时间短

MVA 型由于液晶分子在电场下运动幅度比 TN 型小。加电压后，液晶分子要旋转到预定的位置更快。在凸起物附近斜面的液晶分子，在受电时会迅速旋转，带动离电极更远的液晶分子旋转。因此，MVA 广视角技术有利于提高液晶显示器的响应时间。

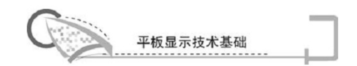
3. 生产效率高

液晶分子在液晶屏内垂直取向排列，不需要平行于基板表面排列。在液晶屏制造上，不再需要摩擦处理，提高了生产效率。

4. 对比度高

加上光学补偿膜后的 MVA 型液晶显示器，正面对比度可以做得非常好，可以达到 3000∶1～5000∶1。但是 MVA 型液晶显示器会随视角的增加而出现颜色变淡的现象，而且特殊电极排列使得电场强度并不均匀。电场强度低时，会造成灰阶显示不正确。尽管在某个特殊方向可以获得很大的视角，但观看屏幕时还可能会看到灰阶逆转的现象。因此，需要把驱动电压增加到 13.5V，以便精确控制液晶分子的转动。需要加光学补偿膜来获得比较理想的视角，成本高。液晶分子排列完全不同于传统的 TN 模式，不能采用传统液晶注入工艺，需要使用新型的 ODF 高速注入工艺(在第 4 章会详细介绍)，降低液晶注入时间。因此，MVA 型液晶显示器的成本会有所提高。





3.4.6　改进的MVA技术

超广视角MVA(Advanced MVA，AMVA)技术是友达光电最新的技术。在传统的MVA技术中，暗态漏光最大的来源是MVA技术中的凸起物。友达光电在AMVA技术中采用聚合物稳定取向技术(Polymer-Stablized Alignment，PSA)，去掉了彩膜基板上的凸起物，大幅度地改善了暗态下的漏光，并结合先进的背光源、偏振片和彩膜，在透光率上大幅度跃进，可以轻易达到超高对比度，画面显示更立体、更锐利。

引例：明基VW2420H

明基采用友达光电独家的AMVA技术与LED背光源结合，实现了水平和垂直视角为178°/178°的广视角，真实的8bit色阶，真实完整的16.7百万色，如图3.20所示，具有NTSC 72%的超广色域值，可以获得色阶平顺、清晰而锐利的影像。

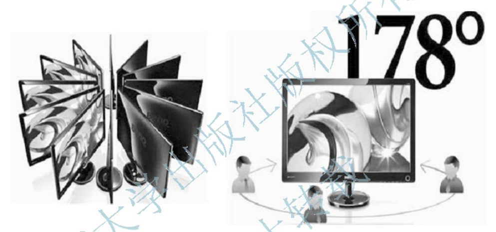


图3.20　明基的AMVA黑锐丽液晶屏(电脑配置网 www.023DN.com)

1. AMVA技术实现方案

AMVA技术可以有效地改善以往VA模式实现大视角下存在的色差问题，在视角上表现更加。工艺实现方案如下。

(1) 在液晶屏的两块基板上形成聚酰亚胺取向层，并在液晶材料中加入少许聚合物单体(Monomer)。不加电压下液晶分子沿取向层的摩擦方向排列，如图3.21(a)所示。

(2) 对液晶显示屏施加一定的电压，在电场的驱使下两块基板取向层表面附近的液晶分子有一定的预倾角，内部的液晶分子由于弹性常数的作用呈现一定的扭曲排列，如图3.21(b)所示。

(3) 用紫外光照射，使聚酰亚胺取向层表面的液晶分子预倾角固定，且使聚合物单体稳定，如图3.21(c)所示。

(4) 不加电压下，形成了液晶分子的有序排列，完成液晶分子的再配向，如图3.21(d)所示。

2. AMVA技术与MVA技术的对比

MVA技术采用阵列基板和彩膜基板分别增加V字型凸起物把每个子像素分成了4个区域，实现光学补偿获得广视角。AMVA中，去掉了彩膜基板上的凸起物，在液晶分子

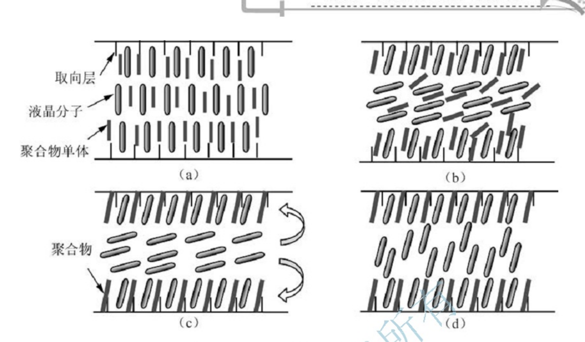


图 3.21 AMVA 技术的实现方案

中添加少量的聚合物，利用凸起物和聚合物的共同作用，把各个像素分成了 8 个区域，如图 3.22 所示。8 个区域分别是：①用凸出物形成类似 MVA 技术的 4 个区域的畴状；②利用聚合物的极性实现两方位角；③综合形成了 4×2 的 8 个区域的多畴取向，可以获得更好的视角特性。AMVA 技术的像素结构如图 3.23 所示。

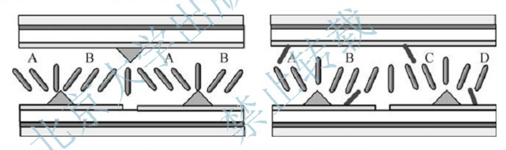


图 3.22 MVA 技术和 AMVA 技术对比

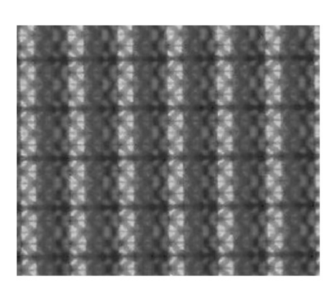


图 3.23 AMVA 技术的 8 畴像素结构(评测中心 IT 168.com)

3.5 PVA 技术的显示原理

图案化垂直排列(Patterned Vertical Alignment)技术缩写为 PVA 技术，是三星公司在富士通 MVA 面板的基础上进一步改善，推出的一种广视角技术，大幅提升了显示效果，获得了优于 MVA 技术的亮度和对比度。同时在 MVA 和 PVA 技术的基础上，又发展了改进型 S-PVA 和 P-MVA 两种类型液晶显示器面板，视角可达 170°，响应时间控制在 20ms 以内。对比度可超过 700：1 的高水准，三星公司的大多数产品都为 PVA 型液晶显示器面板。

3.5.1 PVA 技术的器件结构

PVA 技术是垂直排列 VA 技术的一种，跟 MVA 极其相似，可以说是 MVA 的一种变形。但结构不同，显示原理也不同。

1. 凸起物不同

MVA 技术的上、下基板上间隔分布着三角棱状的凸起物，经垂直取向后，液晶分子在凸起物表面附近及上下基板表面上垂直取向。增加的微小三角棱状的凸起物工艺复杂，成品率低。

PVA 技术直接改变了液晶显示器单元像素结构，采用透明的 ITO 层代替 MVA 中的凸起物，制造工艺与传统的 TN 型液晶显示器技术相兼容。透明电极可以获得更好的开口率，提高显示亮度，最大限度减少背光源的浪费。

2. 电极结构不同

MVA 技术的下基板上形成像素电极，光刻出像素电极的形状，而上基板的 ITO 电极是一个整面的结构，不需要光刻出图形，与传统的 TN 型的 TFT-LCD 结构类似。

PVA 型液晶显示器上基板的 ITO 电极不再是一个完整的 ITO 薄膜，而是光刻出一道道平行的缝隙。上、下基板上的 ITO 电极的缝隙并不对应，而是依次交错排列。交错、平行的 ITO 电极之间恰好可以形成一个倾斜的电场，对入射光进行调制。

3.5.2 PVA 技术的显示原理

PVA 和 MVA 技术毕竟一脉相承，在实际性能表现上两者是相当的。PVA 型液晶显示器也属于常黑模式，上下基板的偏振片光轴垂直。

不加电压下，液晶分子跟 VA 模式一样，液晶分子长轴方向垂直基板表面，且相互间平行排列。入射光经上偏振片，变成平行上偏振片光轴方向的偏振光，穿过液晶层时，偏振方向不变。到下偏振片时，正好垂直于下偏振片的光轴，不透光呈现暗态，如图 3.24(a)所示。

加电压后，液晶分子在交错的 ITO 电极形成的电场作用下，使液晶分子平行于电场方向排列，相当于倾向于水平方向排列。PVA 技术在电场下液晶分子的排列方式，与带有凸起物的 MVA 技术相同，光可以通过各层，由于双折射产生干涉，透光呈现亮态，如图 3.24(b)所示。

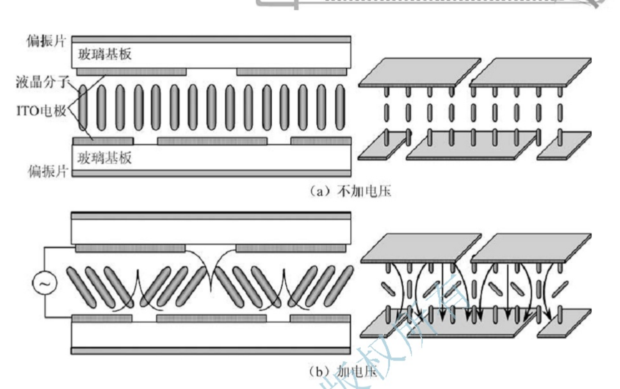


图 3.24 PVA 技术的显示原理

3.5.3 PVA 技术的优点

1. 降低了出现“亮点”的可能性

在性能上，PVA 技术与 MVA 技术基本相当。PVA 技术也属于常黑模式的液晶显示器，不加电场下，屏幕为黑色。同样在生产制作中，如果有一个 TFT 坏点，也同样不会产生“亮点”，大大降低了液晶显示器面板出现“亮点”的可能性。

2. 各个方向均有相应的补偿

PVA 技术在各个方向均有相应的液晶分子作补偿，在视角上表现出除了水平和垂直两个方向外，在其他倾斜角也有不错的显示效果，具有很好的视角特性。

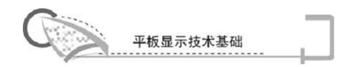
因此，PVA 技术在对比度、水平视角、垂直视角、色彩还原、成本和响应时间上都处于 LCD 行业的前沿。

3.6 ASV 技术的显示原理

先进的超视角技术，Advanced Super View，缩写为 ASV 技术，又称为 Axially Symmetric Vertical(ASV) Alignment 技术，轴对称垂直排列技术，由夏普公司开发的。

3.6.1 ASV 技术的显示原理

不加电压的关态下，液晶分子垂直基板排列，是 VA 模式的一种。下基板的子像素大面积连续覆盖着像素电极，上基板在子像素电极中心有一个面积更小的共用电极。加电压的开态下，在子像素电极 ITO 和另一面基板上的共用电极 ITO 之间，形成一个对角的电



场。该对角的电场驱使液晶分子向子像素ITO电极的中心方向倾斜，形成连续火焰状排列，Continuous Pinwheel Alignment，缩写为CAP技术。因此ASV技术又称为CAP技术。方位角连续旋转360°，如图3.25所示。液晶分子长轴方向旋转成完整的圆，视角锥体均匀对称，视角特性非常好。

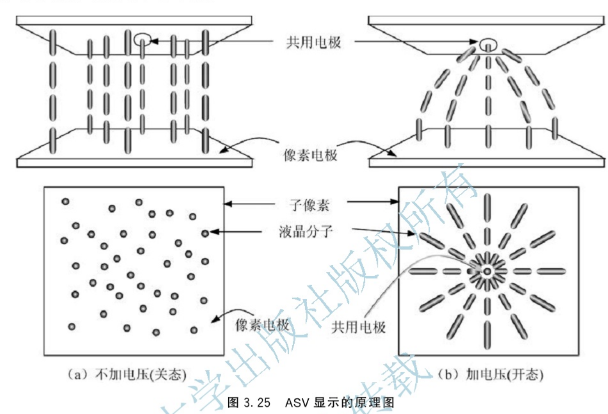


图3.25　ASV显示的原理图

3.6.2　树脂隔离墙

ASV模式的另一个特点是在每一个子像素周围运用了聚合物树脂隔离墙，如图3.26(a)所示。关态下液晶分子垂直排列。施加电压后，在子像素上会出现一种纤维状结构，如图3.26(b)所示。

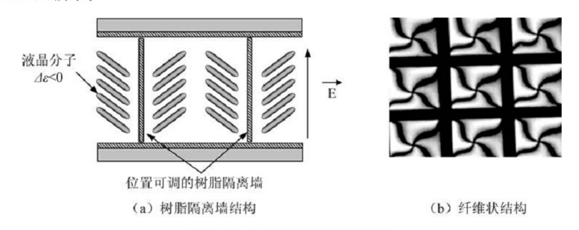


图3.26　ASV模式的树脂墙结构

夏普的ASV技术采用了TN+Film、VA和CAP广视角技术的结合。针对光线的反





射与透射问题而设计的，在屏幕表面加入数层带有特殊化学涂层的光学物质薄膜对外来光线进行处理，构成了类似 TN+Film 的技术。一方面把光线折射成不同的比例，反射的光线得以改变方向并相互抵消；另一方面能最大限度地吸收外来光线，改变光线传播的波长和反射。液晶分子朝着中心电极呈放射的焰火状排列，像素电极上的电场是连续变化的。通过缩小像素间距，调制蜂窝一样的液晶分子排列，令色彩更为均匀，提高响应时间、视角及色彩对比度，是一项能给显示效果带来很大提升的技术。ASV 模式的产品与 MVA 和 PVA 基本相当，如图 3.27 所示。可以实现 170°的视角，对比度大于 10：1，响应时间为 15ms。最近，夏普展示了百万级对比度 ASV 模式的优质液晶显示器，对比度为 100 万：1，是液晶显示行业中最高的对比度。但 ASV 面板价格比较昂贵。目前，ASV 技术的手机也越来越多，最热销的当属魅族 M9 和夏普 SH72198U。



图 3.27　夏普的 ASV 面板(右)(WXIU. com)

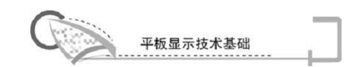
引例：夏普的 ASV 技术与一般液晶技术对比

夏普的 ASV 技术被认为是非常优秀的一种液晶显示器的面板技术，旗下的手机产品大多都采用优秀的 ASV 技术。比一般液晶显示器的色彩对比度、视角好，没有反射的影响，如图 3.28 所示。用 ASV 技术的夏普 9020c 与采用 AMOLED 面板的三星 S8003 的屏幕色彩饱和度非常接近，非常鲜艳，明显超过了普通手机屏幕的效果。



图 3.28　一般液晶电视(上)与夏普的 ASV 模式的液晶电视(下)的对比(天极网 www. yesky. com)





3.7 IPS 技术的显示原理

共面转换(In—Plane Switch)技术缩写为 IPS 技术，也是目前主要的一种 LCD 的广视角技术。利用液晶分子平面转换的方式，即液晶分子平行于基板旋转而不是垂直基板旋转，并通过调控液晶盒厚度、摩擦强度，利用横向电场驱动改变让液晶分子排列方向来增加视角。IPS 技术减少了液晶盒中光线的散射，可获得较宽的视角和良好的色彩再现性。

引例：IPS 技术的应用

IPS 技术最早由日本日立公司于 1996 年推出。松下、LG、三星等面板制造商也广泛采用 IPS 技术来制作液晶显示器。第一代 IPS 技术，已经实现了较好的可视角度，视角为 160°左右，响应时间缩短到 50ms 以内。第二代 IPS 技术，引入了一些新的技术，来改善 IPS 模式在某些特定角度的灰阶逆转现象，视角提升到 178°左右，响应时间缩短到 5ms。

3.7.1 IPS 技术的发展

1996 年日立公司为了提高 TN 面板的视角和解决较差的色彩还原性，发明了共面转换技术。早期的 IPS 技术响应时间比较慢、对比度低。经过不断的优化和改进，IPS 技术获得了较宽的视角和精确的色彩再现，几乎没有偏离角色彩变化。IPS 技术广泛应用在专业绘图人员使用的高端显示设备上。最近价格已下跌，被视做市场的主流。原日立公司的 IPS 技术已经出售给了松下公司。

根据日立公司和 LG 公司 IPS 技术的发展，IPS 技术有多种，见表 3—2 和 3—3。日本日立公司是 IPS 技术的始祖，按照日立公司的发展可以把 IPS 技术分为四个发展历程，IPS(称为 Super TFT，缩写为 S—TFT)、S—IPS、AS—IPS、IPS—PRO。其中 S—IPS，像素呈鱼鳞状分布，如图 3.29 所示。“《”状排列状态，开口方向左右都有。通过导入人字形电极和双畴模式，消除了某些特定角度上的灰阶逆转现象，水平/垂直视角由原来的 160°提升到 178°。大部分 S—IPS 面板响应时间在 8ms 左右。由软屏变成了硬屏，手指轻压，屏幕不会出现模糊及水波纹现象。IPS—α 是在 IPS—PRO 技术的基础上发展起来的下一代技术。

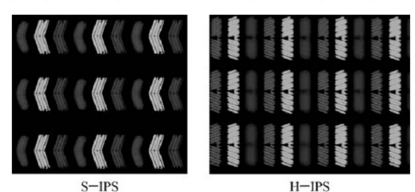


图 3.29 典型 IPS 技术的液晶面板像素排列(来源于维基百科网)

韩国 LG 公司在 S—IPS 技术基础上开发了 H—IPS 技术，液晶分子排列，如图 3.29 所示。解决 S—IPS 的对比度和大角度下发紫等问题，大幅度提高响应时间，减小了色彩漂移，提升色彩还原度。E—IPS 是增强型的 S—IPS，是 H—IPS 的经济版，又称为 Eco-

nomic IPS，经济型的 IPS 液晶显示器。H—IPS 和 E—IPS 面板响应时间可以达到 5ms。

三星电子推出超级 PLS 技术，Super PLS(Plane—to—Line Switching，面线转换)技术。最初的意图是取代传统的 IPS 技术称为超级 PLS 技术，是和 LG 的 IPS 相似的一种技术。超级 PLS 技术优点是①进一步提高了视角；②亮度增加 10%；③生产成本降低 15%；④更好的画面质量；⑤适合于柔性面板。

表 3-2　日立公司 IPS 技术的发展

名称	简称	年	优点	透光率/对比度	描述
Super TFT	IPS	1996	广视角	100/100 性能一般	特点：支持 8 bit 彩色图像。 缺点：响应时间长，最初响应时间约为 50ms；IPS 面板也非常昂贵的
Super—IPS	S—IPS	1998	颜色自由变换	100/137	S—IPS 取代了 IPS，具有 IPS 技术所有的优点，还能提高像素的刷新时间
Advanced Super—IPS	AS—IPS	2002	高透光率	130/250	在 S—IPS 面板基础上进一步提高了对比度，仅次于一些 S—PVAs 技术
IPS—Provectus	IPS—PRO	2004	高对比度	137/313	IPS—α 技术的早期面板，具有更广的色域，对比度比得上 PVA 和 ASV 面板，没有偏离角发光
IPS—alpha	IPS—α	2008	高对比度		IPS—PRO 的下一代
IPS—alpha next gen	IPS—α	2010	高对比度		从日立到松下的技术转让

表 3-3　LG 公司 IPS 技术的发展

名称	简称	年	描述
Horizontal IPS	H—IPS	2007	通过电极的平面排布提高对比度。引入 NEC 先进的真白光偏振片，使白色看起来更加自然，用于专业/图像液晶显示器上
Enhanced IPS	E—IPS	2009	透过性更强，功耗更低，可使用低廉的背光源。对角线方向的视角提高，响应时间进一步降低到 5ms
Professional IPS	P—IPS	2010	可实现 10.7 亿色彩(30 bit 的色彩深度)，每个子像素有 1024 级灰度，而不是 256 级灰度，可产生一个更好的真色彩深度
Advanced IPS	AH—IPS	2011	提高色彩精度，增加分辨率和 PPI，更大的透光率，功耗更低

3.7.2　IPS 技术的器件结构

1. 电极都制作在一块基板上

传统的 TN 型液晶显示器，控制液晶分子的两个电极像素电极和共有电极分别制作在

上下两块基板上，在电场作用下液晶分子垂直基板排列。IPS型液晶显示器中，像素电极和共用电极都制作在同一块基板上，在另一块基板上没有电极，如图3.30。利用梳妆数字电极构成单元像素，电极间距为L，电极宽度为W，在共用电极和像素电极之间加上横向电场来控制液晶分子的排列，因此IPS模式又称为横向场模式。

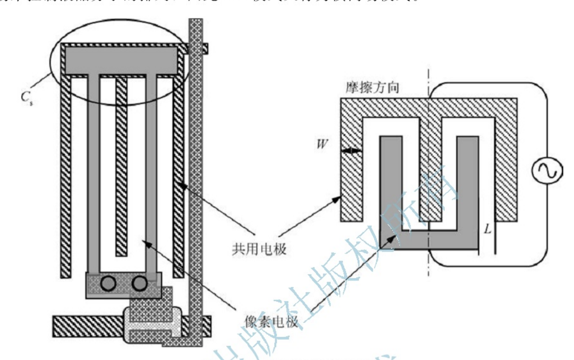


图3.30　IPS技术的电极结构

2. p型液晶的IPS技术原理

IPS技术的液晶材料可以采用正性液晶(p型)，也可以采用负性液晶(n型)。两种材料的IPS技术，不管在任何状态下，液晶分子始终在平行基板的在水平面方向排列以及旋转。在传统的TN型显示的基础上，先介绍p型液晶的IPS技术原理，如图3.31。

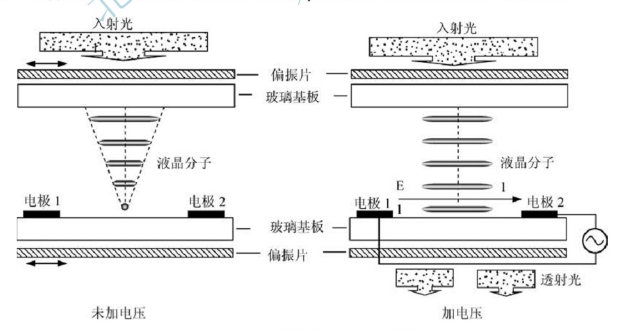


图3.31　p型液晶的IPS技术原理

上下两个偏振片光轴方向平行。下基板内部的摩擦方向与电极方向平行，上基板内部的摩擦方向与上偏振片的光轴方向平行，上下基板的摩擦方向正好成 90°。在未加电压下，液晶屏内的液晶分子从上到下扭曲 90°的向列相排列。这种液晶分子的排列方式与常黑模式 TN－LCD 的结构是相同的。然而，像素电极(电极 1)和共用电极(电极 2)的排列是不同的，在同一平面内且在同一块玻璃基板上，产生的电场(E)基本上平行于基板。注意，图不是按照比例绘制的，液晶分子层只有几个微米厚，电极 1 和 2 之间的间距是非常小的。

p 型液晶具有正的介电各向异性，液晶分子的长轴方向与电场方向一致。在未加电压下，入射光通过上偏振片的线性偏振光在液晶屏内从上到下旋转 90°后，到下偏振片时，正好与偏振片的光轴方向垂直，不透光，呈现黑态(或关态)。在电极 1 和 2 之间施加一个足够的电压，会相应的产生一个电场 E，使液晶分子重新排列后，沿电场方向排列，透过上偏振片的线偏振光经过液晶分子到下偏振片后，与下偏振片的光轴平行，透光，呈现亮态(或开态)。

3. n 型液晶的 IPS 技术原理

上下两个偏振片光轴方向垂直。下基板内部的摩擦方向与电极方向成 45°，与下偏振片光轴平行。上基板内部的摩擦方向与下基板一样。液晶屏内部为 n 型向列相液晶材料，具有介电各向异性的 $\Delta\varepsilon<0$ 作用下，液晶分子倾向于转向电场垂直方向。不加电压下，液晶分子沿基板表面摩擦方向，平行于基板排列。加电压下，n 型液晶垂直于电场排列。在横向电场的作用下，液晶分子在水平面平行旋转到垂直电场方向排列，如图 3.32 所示。

不加电压时，入射光通过下偏振片时，透过的偏振光刚好与液晶分子长轴方向平行，线偏振光透过液晶层，不会发生旋转。到上偏振片时，刚好与上偏振片的光轴垂直，不透光，呈现黑态。

加电压时，由于梳形共用电极和像素电极之间的横向电场作用，液晶分子倾向与垂直电场方向排列。在上下两基板附近的液晶分子沿摩擦方向排列，中间的液晶分子正好垂直电场排列，在电场作用的介电各向异性和摩擦取向的共同作用，液晶屏内的液晶分子从上到下呈扭曲排列。但始终平行基板排列。在液晶屏内构成了双折射的条件，出现相延迟 $\Delta n \cdot d$，输出椭圆偏振光，一部分光从上偏振片光轴透出，呈现亮态，如图 3.32 所示。通过改变液晶分子的长轴方向在平行于基板平面内的方位角控制透光率。处于开态光透过率为：

$$T = T_0 \sin^2(2\theta)\sin^2(\pi\Delta nd/\lambda) \tag{3.6}$$

式中，θ 代表液晶分子长轴与偏振片偏振方向的夹角；d 是上下基板间的距离；Δn 是液晶双折射率。因此，当液晶分子 $\theta=\pi/4$，或者 $\Delta nd=\lambda/2$ 时，透光率最大。为了得到较好的透光率，应使相延迟 $\Delta n \cdot d=\lambda/2$。

在不加电压的关态 $\theta=0$ 时，透光率为 0，呈现黑态。当电压增加，高于阈值电压时，液晶分子在电场作用下开始旋转。负介电常数的液晶分子倾向垂直电场排列，θ 值开始增加，透射光的透光率开始增加。因此，透光率随着液晶分子在电场下在平行基板的平面内旋转角度的增大而增大，中间的液晶分子刚好旋转 45°，垂直电场排列时，透光率为最大。由于液晶分子始终在平行基板的平面内旋转，没有在垂直液晶屏的方向上旋转，所以液晶分子在屏幕上投影的表观长度不变，视角相依性较小，从而实现宽视角。

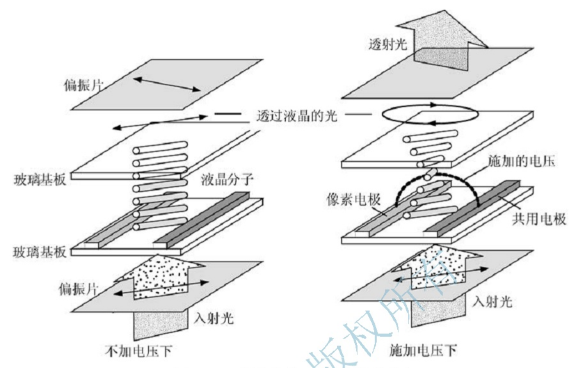


图 3.32 n 型液晶的 IPS 技术显示原理

3.7.4 IPS 技术的特点

1. 避免上下基板间的交叉串扰

IPS 技术的液晶显示器有一块基板上面没有电极，本身不导电可以更好地避免上下基板间的交叉串扰。

2. 极好的视角特性

IPS 技术采用梳状电极或者侧向电极，消除了 TN 型液晶显示器从水平到垂直旋转的排列状态。采用独特的分子水平转换结构改善视角，不需要额外加补偿膜，就可以实现在任何角度观看显示出的一致精确的色彩。

3. 有硬屏之称

IPS 技术的液晶屏内液晶分子排列呈水平状。当遇到外界压力时，分子结构向下稍微下陷，但整体分子还是呈现水平状排列。比较硬，没有闪光现象，用手轻轻按或划不容易出现水纹样变形，有硬屏之称，如图 3.33(a)所示。但 VA 型液晶屏内液晶分子垂直排列，轻按后出现大面积明显的闪光区域，就是俗称的水纹现象，如图 3.33(b)所示。IPS 硬屏的分子复原速度更快，消除了敲击软屏时难以避免的残影，显示效果清晰。IPS 技术的液晶屏稳定性、抗压性高，动态画面表现好。

4. 开口率及透光率低

梳状电极制作在同一块基板上，电极密度增大，降低了开口率，透光率降低。并且处于电极中心位置的液晶分子不发生旋转，也会降低透光率。为了增加亮度，需要高亮度背光源，增加功耗，驱动电压高。

5. 工作温度范围受限

IPS 技术对液晶屏的盒厚均匀性要求严格，为不降低成品率，需要使用介电各向异性



Δn 大的液晶材料。但这种液晶材料的清凉点较低，限制了工作温度范围。

6. 响应速度慢

IPS 技术响应时间较慢和对比度较难提高，存在色移等缺陷。

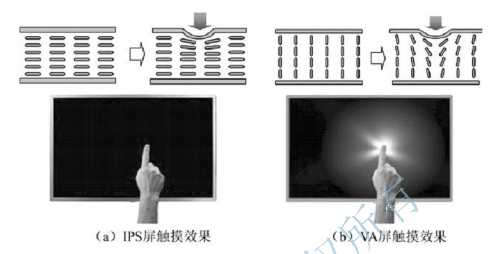


图 3.33 IPS 屏和 VA 屏触摸效果对比

3.7.5 提高响应速度的技术方案

在 IPS 型液晶显示器中，液晶屏盒厚、旋转的黏度系数、扭曲的弹性常数和取向摩擦的角度是影响共面转换液晶显示器响应速度的重要因素。通过解决这些影响因素，提高响应速度的技术方案有如下 4 种。

1. 减小盒厚

减小液晶屏的盒厚是提高 IPS 技术响应速度的最直接方法。但是盒厚太薄，对制作工艺提出严峻的考验和挑战。

2. 改变摩擦角度

改变基板取向摩擦角度是提高 IPS 技术响应速度的最简单方法。摩擦角度从 7°增加到 17°，响应速度提高了两倍。

3. 采用单面摩擦的 IPS 技术

采用单面摩擦的 IPS 技术可以得到宽的视角、高的对比度、高的灰度级、较快的响应速度，并且可以消除共面转换模式的色移现象。

4. 加入液晶聚合物

在液晶材料中加入一定浓度的液晶聚合物。利用紫外光处理形成聚合物网络可以对液晶分子起到锚定的作用，大大改善 IPS 型液晶显示器的响应速度。

3.7.6 改善色移的技术方案

1. 色移产生的原因

IPS 技术在偏离垂直方向，特别是在平行于 IPS 模式的液晶分子指向矢和垂直于指向



矢方向上有色移。从透光率公式(3.6)可以看出，当Δn变化时与$\Delta n \cdot d$和λ对应的透光率会发生变化。双折射率Δn的大小与视角的方向有关，随着视角的变化会发生色移。当观察方向和液晶分子的短轴一致时，Δn减小，最大透光率对应的入射光波长变短，将发生蓝色色移；当观察方向和液晶分子的长轴一致时，Δn增加，最大透光率对应的入射光波长变长，将发生黄色色移。

2. 改善色移的技术方案

为了解决色移的问题提出了采用楔形电极的方法，如图3.34所示。在一个像素上有两种不同的电场方向。加电压时，上下两个畴中的液晶分子分别沿顺时针方向和逆时针方向旋转。减少了$\Delta n \cdot d$随视角的变化，使视角特性得到有效的相互补偿，解决了色相随方位角变化而变化的问题。但采用这种楔形电极会使制作过程变得复杂。

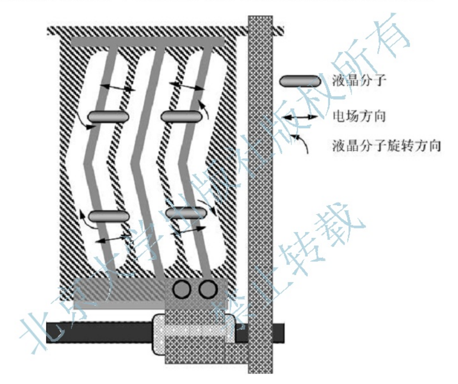


图3.34 使用楔形电极的IPS像素结构

3.7.7 共面转换的扭曲向列相技术

共面转换的扭曲向列相(In Plane Switching Twisted Nematic，IT)技术使用n型液晶，液晶分子长轴方向从下基板到上基板扭曲90°。上下两偏振片光轴方向垂直，分别与基板表面液晶分子长轴方向平行，其原理如图3.35所示。不加电压时，入射光可以透过液晶屏；加电压时，液晶分子在电场驱动下成平行排列，不能透光，为常白模式。

IT模式所有液晶分子指向矢的旋转都平行于基板，比TN型液晶显示器的视角宽。液晶屏的误差不会影响透光率，不使用任何补偿膜就可以解决色移。使用n型液晶材料是为了抑制电极附近液晶分子的杂乱排列。加入手性剂是为了液晶分子均匀扭曲排列提高响应速度。

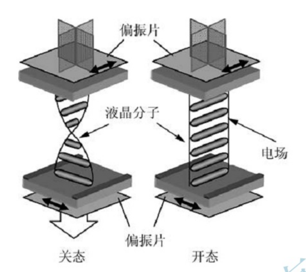


图 3.35 共面转换的扭曲向列相技术显示原理

3.8 FFS 技术的显示原理

IPS 模式中电极上的液晶分子在加电压时不旋转，且梳形电极一个电极采用金属材料，开口率比 TN 型液晶显示器的开口率低。为了提高开口率，提出了边缘场开关模式。边缘场开关(Fringe field switching，FFS)模式具有与 IPS 模式一样的广视角特性，电极上的液晶分子一样可以在电场下旋转，电极间距小，并采用透明电极，具有高的开口率。

3.8.1 FFS 技术发展

第一代 FFS 技术使用同 IPS 技术相同的负性液晶材料($\Delta\varepsilon<0$)。在边缘电场作用下垂直于电场排列，光透过率高，如 15.0″的 XGA，解决了 IPS 技术的开口率低、透光少的问题，并降低了功耗。但负性液晶材料旋转黏性高、存在色偏、驱动电压高、响应速度慢，且有残像，价格贵。

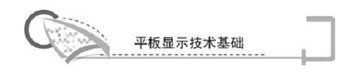
渐渐开发正性液晶材料的 FFS 模式，如 18.1″的 SXGA，21.3″的 UXGA，15.0″的 XGA 等。正性液晶($\Delta\varepsilon>0$)响应速度快，驱动电压低，饱和电压低，残余直流电压低，价格便宜。缺点是正性液晶分子在边缘电场作用下有可能倾斜排列，光利用率低。

第二代 FFS 技术为超边缘场模式，Ultra-FFS TFT-LCD，双畴像素结构，解决了色偏的问题，缩短了响应时间。第三代 FFS 技术通过利用电动力学原理，实现了先进的 FFS(Advanced-FFS，AFFS)技术。AFFS 技术解决了由于电场畸变导致的灰阶逆转现象，具有高亮度、真彩色、超宽视角的优点。水平和垂直视角都可以达到 180°。

3.8.2 IPS 与 FFS 技术对比

1. 电场不同

IPS 模式中一个电极是金属电极，另一个电极是 ITO 像素电极，电极间距大。电极间距 L 大于液晶屏的盒厚 d 和电极宽度 W。加电压时，水平电场主要存在于电极之间，电极中心处是近似垂直的电场。在加电压下，电极上方的液晶分子不旋转，如图 3.36(a)所



示。ITO电极厚度为400Å左右，与金属电极的间距 L 为 $10\mu m$ 左右，电极宽度 W 为 $6\mu m$ 左右，液晶屏的盒厚 d 约为 $4\mu m$ 左右。

在FFS模式中两个电极都是透明的ITO电极，电极间距小。电极间的距离 L 小于液晶屏的盒厚 d 和电极宽度 W。加电压时整个液晶屏内的电场线呈抛物线形状。电极上方有电场的水平分量，又有电场的垂直分量，液晶分子也可以旋转，从而增大了开口率，提高了液晶屏的透光率，如图3.36(b)所示。

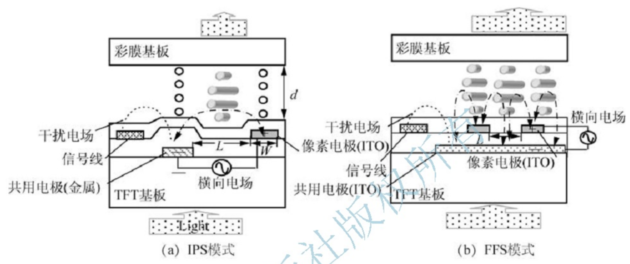


图3.36　IPS模式和FFS模式电极和电场不同

2. 存储电容面积不同

IPS模式用ITO的像素电极和金属材料的共用电极作为横向电场的正负两个电极。同时构成了存储电容的上下两个电极，中间是钝化膜。共用电极做成条形结构，存储电容面积小，如图3.37(a)所示。

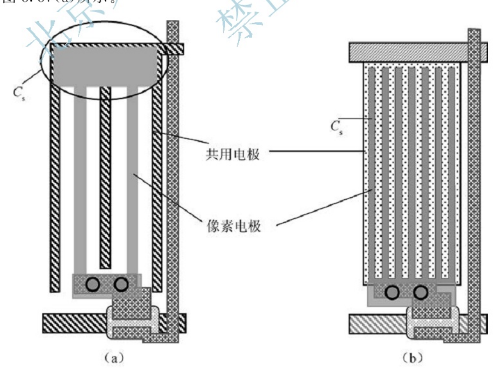


图3.37　IPS和FFS模式单元像素不同

FFS 模式上下两层 ITO 电极分别形成像素电极和共用电极，构成横向电场的正负两个电极，并且作为存储电容的上下两个电极，中间用 1500Å 的 SiO_2 钝化膜隔开。第一层 ITO 的共用电极制作成矩形，第二层像素电极 ITO 制作成长条形，宽度是 3μm，存储电容面积大，如图 3.37(b)所示。

3. 交叉串扰不同

FFS 模式的存储电容面积大，C_s电容大，可以很好地存储图像，并且可以避免交叉串扰。交叉串扰定义为不应该参加显示的信号影响到显示画面，画面出现失真的现象。FFS 模式存储电容 C_s引起耦合作用减小，因此交叉串扰小。

$$\Delta V_p = (\frac{C_{dp}}{C_T}) \cdot \Delta V_s \tag{3.7}$$

总电容 C_T为：

$$C_T = C_s + C_{LC} + C_{gs} \tag{3.8}$$

式中，ΔV_s为实现不同画面显示的信号电压的变化值；C_{dp}为数据线与像素电极之间的耦合电容，会引起干扰电场；C_{LC}为液晶电容；C_{gs}为栅极和源极之间的栅源寄生电容。为避免跳变电压引起的显示缺陷，跳变电压越小越好。FFS 模式的 C_s大于 IPS 模式的 C_s。FFS 模式的总电容 C_T更大，跳变电压 ΔV_p更小，交叉串扰小。

FFS 模式在垂直方向上，数据线和像素电极之间的电场方向与摩擦方向一致，数据线的耦合电容 C_{dp}引起的干扰电压不会改变液晶分子排列状态，垂直方向的交叉串扰消失。在水平方向上，由于栅极交叠电容 C_{gs}存在，有交叉串扰现象。因此，数据线侧的黑矩阵可以做得小些，栅线侧的黑矩阵要做得相对大些，避免交叉串扰现象。

3.8.3 FFS 技术的显示原理

FFS 技术是从 IPS 技术发展而来，显示原理与 IPS 技术类似。上下基板的偏振片光轴相互垂直。下基板内部的表面取向层 45°摩擦，上基板与下基板的摩擦方向相反成 180°。下基板的偏振片光轴平行于下基板的摩擦方向，并且垂直于上基板偏振片的光轴方向。早期采用的同 IPS 技术一样的负性液晶($\Delta\varepsilon < 0$)，改进后采用的是正性液晶($\Delta\varepsilon > 0$)材料。本节以正性液晶为例，说明 FFS 技术的原理和特点。

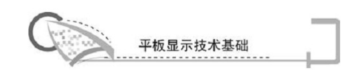
不加电压下，液晶分子沿取向层摩擦方向排列，液晶分子与下偏振片光轴平行。通过下偏振片的偏振光，透过液晶层，光偏振方向不变。到上偏振片刚好与光轴垂直，不透光，为暗态。

加电压下，当电压高于液晶材料的阈值电压 V_{TH}时，产生的边缘场驱动液晶分子在平行基板的平面内旋转。正性液晶材料在电场下倾向于平行电场排列。光的偏振方向会发生变化，有光透出上偏振片，为亮态。由 IPS 技术和 FFS 技术的透光率公式(3.6)，不同角度下会有不同程度的透光率。

在电场驱动下，液晶分子的扭转力为：

$$N = \frac{1}{2} \cdot \Delta\varepsilon \cdot E^2 \cdot \sin^2 2\phi \tag{3.9}$$

式中，$\Delta\varepsilon$ 为液晶材料的介电各向异性；E 为电场强度；ϕ 为扭转角度，液晶分子长轴与电场方向的夹角。由式(3.9)看出，当增加 ϕ 时，扭转力会增加，响应速度也会得到提高。



在不加电压的关态下，液晶分子在锚定力的作用下恢复到沿取向层摩擦方向排列。在加电压下，液晶分子在扭转力作用下按照电场相应方向排列。相邻的液晶分子之间依靠弹性力作用，牵动着相应排列。

3.8.4 FFS 技术的工艺方案

FFS 技术采用 1+5 次光刻的工艺，如图 3.38 所示。第一次光刻形成共用电极。共用电极采用溅射方法制备氧化铟锡 ITO 薄膜，光刻后形成矩形的盒状结构。

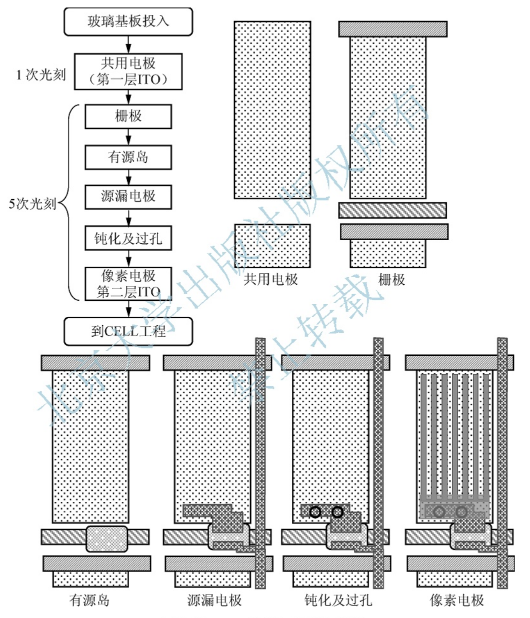


图 3.38 FFS 模式的 1+5 次光刻

共用电极制作完成后，采用 5 次光刻的工艺技术制作薄膜晶体管的阵列，详细工艺在第 7 章和第 8 章中介绍。5 次光刻的第一光刻形成栅极，其中一条线与共用电极直接接触，形成共用电极引线。另一条线为 TFT 的栅线，同时作为 TFT 的栅极。第二次、第三次光刻形成有源岛、源漏电极。第四次光刻形成 TFT 的保护膜，同时形成与像素电极连接的



孔，称为钝化及过孔工艺。第五次光刻形成像素电极，像素电极也为透明的ITO材料，FFS技术中光刻成楔形，不同于传统TFT的矩形像素电极结构。

3.8.5　双畴FFS技术

1. 色差的问题

传统的FFS技术中存在色差的问题，不同的观看方向会有不同的色彩，如图3.39所示。色差产生的原因是，随着视角的变化，液晶分子双折射导致的光程差 $\Delta n \cdot d$ 发生了变化。$\Delta n \cdot d$ 不同，相位延迟 $2\pi\Delta nd/\lambda$ 不同，观看到的光波长不同。因此，透射光的波长与光程差 Δnd 一起波动。平行液晶分子长轴时，Δn 最小；垂直液晶分子长轴时，Δn 最大。平行于液晶分子长轴观看到的波长偏小，色彩偏蓝色；垂直液晶分子长轴观看到的波长偏大，色彩偏黄色。

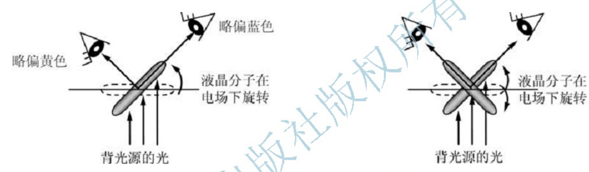


图3.39　单畴(左)和双畴(右)FFS技术的色差

FFS技术中由于 $\Delta n \cdot d$ 的不同，使得从平行和垂直于液晶分子长轴方向观看到的色彩不同。解决色差的办法是采用双畴像素的结构，又称Ultra FFS，缩写为UFFS。利用液晶分子在电场下不同的旋转方向实现自补偿。从各个方向观看，都可以获得几乎相同的色彩，提高了视角。

2. 相邻像素的双畴FFS模式

2002年Kim和Lee等在美国申请一种双畴FFS模的专利，改善了传统的FFS中的色移问题，且提高了响应速度，如图3.40所示。

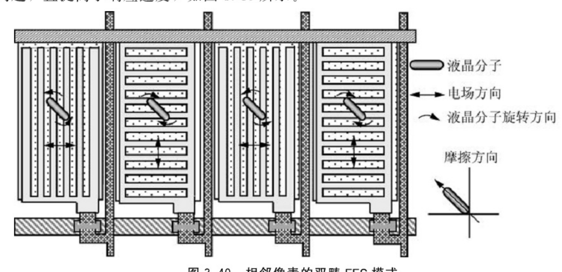


图3.40　相邻像素的双畴FFS模式

在相邻的两个像素上，一个形成平行于信号线的横向边缘电场，另一个形成平行于栅线的横向边缘电场，两个像素边缘场的方向相互垂直。相邻的两个像素之间液晶分子的旋转方向不同，实现了自补偿，有效地解决了色移的问题。不加电压下，液晶分子沿摩擦方向排列。加电压下，正性液晶分子平行电场排列，第一个像素逆时针旋转，第二个像素顺时针旋转，依次排列。

3. 单像素的双畴 FFS 模式

单畴的 FFS 结构中，条形像素电极平行信号线或者垂直信号线。像素电极平行信号线结构如图 3.41(a)所示。表面取向层的摩擦方向与基板成 45°。不加电压下，液晶分子沿摩擦方向排列。加电压下，液晶分子在电场作用下，正性液晶分子平行电场方向排列，液晶分子逆时针旋转。

双畴的 FFS 结构中，共用电极线在中间，把像素电极分成上下两部分。条形电极的方向不同，分别与信号线成一定的角度。表面取向层的摩擦方向平行于信号线方向。不加电压下，液晶分子沿摩擦方向排列。加电压后，正性液晶分子平行于电场方向排列。像素电极上部分的液晶分子顺时针旋转，像素电极下部分的液晶分子逆时针旋转，如图 3.41(b)所示。两个方向旋转的液晶分子形成了两个不同的畴。

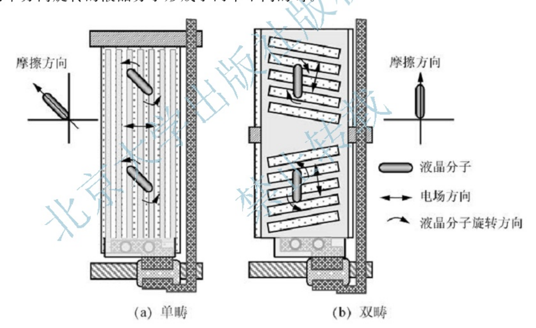


图 3.41　单畴的 FFS 模式和双畴的 FFS 模式

3.8.6　AFFS 技术的特点

AFFS 技术是先进的边缘场技术，从 5 个方面进行了改进，提高开口率，获得高透光率，消除了灰阶逆转现象，无色差，视角可以提高到 180°，交叉串扰小，且最大限度的利用背光源，降低了功耗，可以更加环保。

1. 透明电极

正负电极不再间隔排列，两个电极都采用透明 ITO 电极，不会遮挡光线，开口率固然增大。

2. 电极上的液晶分子可以旋转

AFFS 模式改变第二层 ITO 的边缘，控制两层 ITO 的线宽变化。由于边缘电场作用，在电极上的液晶分子也可以发生旋转，开口率进一步增大，透光面积大于 IPS 模式。

3. 参数控制

通过改变各种参数增大透光率，如电极宽度、电极间距、液晶屏盒厚、液晶材料性质、摩擦角度等。

4. 减小黑矩阵宽度

通过优化像素电极的楔形的形状，消除像素边缘由于楔形变形引起的暗态区域，即消除了信号线与像素电极间的漏光，降低了信号线侧黑矩阵的宽度，开口率可增大到 70%。

5. 黑矩阵自对准

自对准黑矩阵结构抑制光泄露，省掉了彩膜基板侧的黑矩阵，进一步提高了光透过率。

总之，AFFS 模式透光率高于 IPS 模式，可达 TN-LCD 的 95%。3 种模式下的透光率对比曲线如图 3.42 所示。事实上，AFFS 技术除了响应时间稍逊色外，其他方面都非常出色，兼有高画质和广视角的特点。

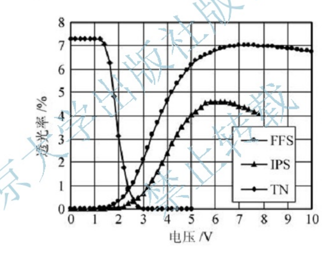


图 3.42 TN、IPS、AFFS 模式的透光率对比曲线

3.8.7 双面边缘场开关模式(DSFFS)

边缘场开关模式 FFS 由于在上基板上面没有边缘场，结构的不对称性限制了视角的进一步增大。2003 年，C. Y. Xiang 和 X. W. Sun 提出一种增大视角并提高响应速度的 DS-FFS(Double side fringe field switching，双面边缘场开关)模式，如图 3.43 所示。

DSFFS 模式 B_1 和 B_2 分别是下基板和上基板上的条形电极，相互垂直。A_1 和 A_2 是下基板和上基板上的两个平板电极。条形电极和平板电极之间用 SiO_2 隔开。因此，DSFFS 模式是将上、下两个边缘场拼凑到一起形成的。

聚酰亚胺取向层与两块基板的条形电极成 45°摩擦，使负性液晶分子排列均匀。上下基板的偏振片与光轴垂直。不加电压时，不透光，呈现黑态；加电压时，透光，呈现白态。

上下基板的顶部和底部的边缘场共同驱动液晶分子旋转。液晶屏的盒厚控制与 FFS 模式共同作用下，DSFFS 只需要扭曲从底部或者从顶部到液晶屏中间的液晶分子。FFS

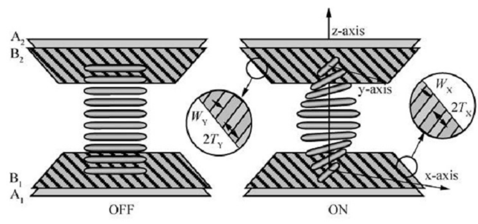


图 3.43 双面边缘场开关模式的显示原理

模式需要扭曲从底部到顶部的所有液晶分子。所以，DSFFS 型的液晶屏上升时间和下降时间都比 FFS 模式更短。液晶分子的长轴方向相对中心平面呈对称分布，扭曲角的变化是 FFS 型液晶屏的两倍。因此，双面边缘场开关模式具有更快的响应速度和更宽的视角。

3.9 OCB 技术

光学补偿双折射(Optically Compensated Birefringence, OCB)技术又称为光学补偿弯曲排列(Optically Compensated Bend)。OCB 技术是巧妙设计液晶分子排列方式来实现自我补偿视角的技术，又称为自补偿模式。

3.9.1 OCB 技术的原理

OCB 模式的液晶显示器看上去像两层 TN 模式的液晶层相叠形成的。液晶分子排列上下对称，成弯曲排列，如图 3.44 所示。下部分的液晶分子双折射性导致的相位偏差正好可以利用上部分的液晶分子的排列自行补偿抵消。弯曲排列 OCB 工艺相对于扭曲排列的 TN 工艺要更简单些。

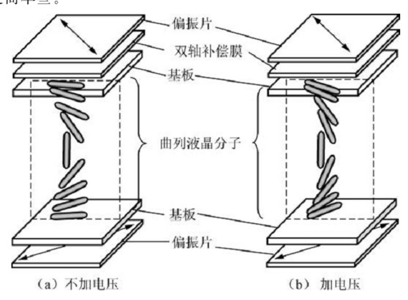


图 3.44 OCB 技术的显示原理图

在弯曲排列的液晶分子中，中间液晶分子在不加电压和加电压下始终处于与基板垂直排列的状态。内部液晶分子紧密排列在一起。不加电压下不透光，为暗态；加电压后输出椭圆偏振光，为亮态。

加电压后，液晶分子平行电场排列，在中间液晶分子的牵动下，能促使整个液晶屏内的液晶分子加速平行电场排列。在不加电压和加电压下，液晶分子长轴方向始终在一个平面内变化，呈弯曲变化。不像TN模式液晶分子长轴方向从上到下基板需要扭曲排列。因此，OCB模式响应速度快。

3.9.2 OCB技术的特点

1. 无灰阶逆转现象

在自补偿和双轴光学补偿膜的补偿下，OCB模式的液晶显示可以实现很好的视角，且视角均匀性非常好，在不同的方位不会出现TN模式固有的灰阶逆转现象。

2. 对比度高

OCB模式在不加电压下为暗态，属于常黑模式液晶显示器。出现亮点的几率很低，还原的黑色特别纯。在黑色显示时，各个方位观看都不会出现漏光，对比度高。

3. 响应速度快

OCB模式的响应速度非常快，即使加了双轴补偿膜，响应时间也不超过10ms，目前已经有1ms到5ms的产品，适合于动态图像的显示应用。

4. 需要开机预置时间

OCB模式在不加电压下，液晶分子是平行于基板排列的，要实现液晶分子的弯曲排列，每次开机都需要一定的预置时间来让液晶分子扭动到合适位置才能正常工作。

本章小结

液晶显示器本身不能发光，液晶分子的排列方式及扭曲的角度不同，以及材料的各向异性等导致液晶显示器存在视角的问题。本章主要针对液晶显示器存在的视角问题，讲述了为提高视角特性提出的多种广视角技术。从传统的液晶显示器的视角产生的原因开始，分别概述了各种广视角技术的结构特点、实现方案、显示原理及各种广视角技术的优缺点。

1. 膜补偿技术

膜补偿技术（TN＋Film）是在原有TN模式的基础上，在液晶盒外部粘贴一些各向异性的光学膜，以补偿由于液晶分子状态不同而产生的光学性质不同来改善视角的。膜补偿技术是一种简单易行、最廉价的方法，有效地提高了视角。但由于补偿膜固定贴在液晶屏上，不能对任意灰阶、任意观察角度进行补偿，提高视角的幅度有限。

2. MVA技术

垂直取向（Vertical Alignment，VA）技术在目前的显示器产品中应用较为广泛。VA技术有两种：一种为MVA技术，另一种为PVA技术。

多畴垂直排列(Multi－Domain Vertical Alignment，MVA)技术通过在阵列基板和彩膜基板依次交错排列V字型直条三角棱状凸起物，把液晶显示器的每一个子像素分成4个取向不同的畴，实现广视角。上下和左右的总视角分别可以达到160°，从任何方向都可以看见清晰的画面。生产效率高，但制作成本也会有所提高。

超广视角MVA(Advanced MVA，AMVA)技术以MVA技术为基础，在液晶材料中添加聚合物稳定取向材料，每一个子像素形成了8个取向不同的畴，消除了MVA技术暗态下的漏光，可以获得色阶平顺、清晰而锐利的影像。

3. PVA技术

图案化垂直排列(Patterned Vertical Alignment，PVA)技术通过采用透明的ITO层光刻出依次交错平行的缝隙，代替MVA中的凸起物。视角可达到170°，且可以获得更好的开口率，提高显示亮度，最大限度地减少背光源的浪费。PVA技术在对比度、水平视角、垂直视角、色彩还原、成本和响应时间上都处于LCD行业的前沿。

4. ASV技术

先进的超视角(Advanced Super View，ASV)技术也是一种垂直排列的VA技术。下基板子像素大面积连续覆盖着像素电极，上基板在子像素电极中心有一个面积更小的共用电极，上下基板上的ITO电极形成一个对角的电场。连续变化的电场使得液晶分子整体上看起来像是放射状的连续火焰方式排列。连续焰火状排列又称为CAP技术(Continuous Pinwheel Alignment，CAP)。

5. IPS技术

共面转换(In-Plane Switch，IPS)技术不同于传统液晶显示器，共用电极和像素电极都同时制作在阵列基板上，彩膜基板上没有电极，很好地避免了交叉短路。液晶分子始终在平行基板的平面内旋转，视角可以提升到178°，有硬屏之称。

6. FFS技术

边缘场开关(Fringe field switching，FFS)技术是在IPS技术的基础上发展起来的广视角技术。采用两层ITO薄膜，分别作为横向电场的共用电极和像素电极，有效地提高了开口率。电极间距做得很小，电极上面的液晶分子也可以在电场下旋转。采用单像素双畴模式的FFS技术后，视角可以提高到180°，交叉串扰小，最大限度地利用背光源，降低了功耗，可以更加环保。

7. OCB技术

光学补偿双折射(Optically Compensated Birefringence，OCB)技术巧妙地排列液晶分子，实现自我补偿广视角的同时，响应速度很快。

本章习题

一、填空题

1. 一般用液晶显示器的3个参数来衡量画面不失真下视角的大小：____________、色差和____________。

2. 提高广视角技术有很多种，MVA技术是指________________、PVA技术是指______________、IPS技术是指______________、FFS技术是指______________、OCB技术是指光学补偿双折射技术，ASV技术是指先进的广视角技术等。

3. 目前垂直取向广视角技术(VA技术)有两种，____________和____________。

4. MVA技术的TFT-LCD一般采用____________次光刻的工艺。

5. MVA技术的________________状的凸起物分别制作在________________基板和____________基板上。

6. 超广视角MVA技术(AMVA)，在传统的MVA技术中增加了____________技术，可以轻易达到超高对比度，画面显示更立体、更锐利。

7. CAP技术是一种____________技术，是垂直排列VA技术的一种。

8. IPS技术中为了解决色移的问题，提出了采用____________电极的方法。

9. FFS技术的横向电场的两个电极分别是____________和____________材料。

10. FFS技术解决色差的问题，采用了____________技术。

二、判断题

1. 一台液晶显示器标注的视角为176°/176°，指的是左视角为176°，右视角也为176°。(　　)

2. 膜补偿技术中，正性补偿膜用于补偿负性双折射率的液晶显示器。(　　)

3. 双面补偿膜技术是在液晶屏的两侧贴上补偿膜，外面再贴上偏振片。(　　)

4. MVA型液晶显示器主要是常白模式的。(　　)

5. IPS技术中液晶分子是垂直取向的。(　　)

6. IPS技术和VA技术都是常用的硬屏技术。(　　)

7. FFS技术是从IPS技术发展起来的。(　　)

8. FFS技术可以采用正性液晶，也可以采用负性液晶材料。(　　)

9. FFS技术的存储电容小。(　　)

10. 相邻像素的双畴FFS模式中，横向电场平行。(　　)

三、名词解释

视角、灰阶逆转、色差、漏光现象、水平视角、垂直视角、补偿膜技术

四、简答题

1. 简述视角产生的原因。
2. 简述VA技术是如何实现光学补偿的。
3. 简述MVA技术的显示原理。
4. 描述MVA技术的工艺方案。
5. 简述PVA技术和MVA技术的主要不同。
6. 简述IPS技术的器件结构。
7. 描述IPS技术的显示原理。
8. 简述FFS技术与IPS技术的差别。
9. 简述单像素双畴FFS模式的实现原理。
10. 简述FFS技术中电极和电场的特点。

五、计算题与分析题

1. 描述 FFS 技术的工艺流程，并绘制平面图形。
2. 描述 MVA 技术如何实现广视角。
3. 举例说明多畴模式的作用。
4. 举例说明色差问题产生的原因。
5. 分析漏光产生的原因。

六、思考题

1. IPS 技术为什么有硬屏之称？通过与其他广视角技术对比举例说明。
2. 通过举例说明广视角技术的设计原则及实现原理。
3. 你认为最有前景的广视角技术是哪一种？为什么？
4. 为什么说 PVA 技术有降低亮点的可能性？还有哪些技术可以降低亮点呢？

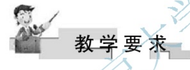
第 4 章

液晶显示器的制屏和模块工艺技术

液晶显示器的制作工艺分为三大部分，阵列工艺、制屏工艺、模块工艺。阵列工艺就是指在玻璃基板上有规则地排列薄膜晶体管的工程，将在第 7 章和第 8 章介绍。本章重点介绍制屏和模块的工艺技术。通过本章的学习，可以清楚地知道液晶显示器的液晶屏和模组到底是怎么制作出来的，主要包括哪些工艺，关键工艺技术和特点是什么。



● 了解制屏工艺的工艺流程；
● 了解制屏工艺的工艺原理及设备；
● 掌握制屏工艺使用的材料及要求；
● 了解模块工艺的种类及工艺流程；

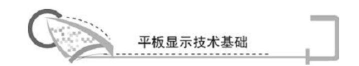


知识要点	能力要求	相关知识
制屏工艺流程	(1) 掌握制屏工艺各工序的作用及特点 (2) 了解制屏工艺使用的设备及相应参数	液晶材料的性质
ODF 工艺	(1) 了解 ODF 工艺的特点 (2) 掌握 ODF 工艺的流程和作用	
传统的液晶注入工艺	(1) 了解传统的液晶注入方法 (2) 掌握传统的液晶注入工艺的流程和作用	
模块工艺流程	(1) 了解模块工艺的种类 (2) 掌握 COG 工艺流程和特点 (3) 掌握 COF 工艺流程和特点	驱动 IC 的作用



[1] David J. R. Cristaldi, Salvatore Pennisi, Francesco Pulvirenti, Liquid Crystal Display Drivers Techniques and Circuits[M], Springer, 2009.

[2] 范志新. 液晶器件工艺基础[M]. 北京邮电大学出版社，2000.





基本概念

制屏工艺：把阵列基板和彩膜基板经过表面处理后，贴合组装、注入液晶材料，并进行封装的工艺。

模块工艺：将液晶屏、驱动电路、柔性线路板(FPC)、印刷电路板(PCB)、背光源等组件绑定组装在一起的工艺。



发现故事：扭曲向列型液晶显示器

1970年12月4日，由瑞士罗氏(Hoffmann－La Roche)公司的Wolfgang Helfrich和Martin Schadt等人制作出的第一个扭曲向列型液晶显示器(TN-LCD)是最早实用的液晶显示器，如图4.1所示。

Helfrich最早在美国RCA公司的液晶组工作。在1969年，他提出了一个基于p型液晶分子扭转的新想法，并认为这种液晶可以开始一类不同的显示。但是当时由于需要两个偏振片，他的新想法没有被重视。后来，Helfrich离开了RCA公司，在1970年10月，加入瑞士罗氏H. Roche公司，与同事Schadt等人一起在几周内制作出扭曲向列相型液晶显示器，从此，掀开了液晶显示时代惊人的序幕。



图 4.1 Helfrich和Schadt制作的第一个TN LCD的显示样机

4.1 制屏工艺简介

液晶显示器可以分成有源矩阵和无源矩阵两类。按照液晶显示器的发展，先出现的是无源矩阵液晶显示器，制作工艺可以分为制屏工艺和模块工艺。有源矩阵液晶显示器是包含了有源器件的液晶显示器，制作工艺还包含阵列工艺。两种显示器在制屏工艺和模块工艺有很多相似的地方，因此本章侧重于有源矩阵液晶显示器的制屏工艺和模块工艺。

有源矩阵电极都作在阵列基板一侧，彩膜基板上的ITO只是共用电极，在整个基板上是一个完整的ITO，制屏工艺没有图形光刻工艺。无源矩阵液晶显示器不同的是两个电极分别制作在上下两个基板上，制屏工艺包含有ITO图形光刻工艺。ITO图形光刻工艺与阵列工艺的光刻工艺类似，这里不再介绍，详见第8章。

随着液晶显示器时代的发展，为制作高精度、高品质、大尺寸的液晶显示器，制屏工艺也在不断地发展。根据液晶填充的方式分，有液晶注入式工艺和液晶滴下式的ODF工



艺(One Drop Filling)。传统采用的是液晶注入式工艺，5 代线之后采用的是液晶滴下式的 ODF 工艺，整个工艺流程如图 4.2 所示。本章的制屏工艺侧重于液晶滴下式的 ODF 工艺，不包括虚线框内的工艺。为对比，用虚线框写出了传统的液晶注入工艺的步骤。除了液晶注入方式的不同，传统的制屏工艺流程中没有 ODF 工艺，采用的是虚线框内的液晶注入流程，其他工艺两者有很多相同的地方。

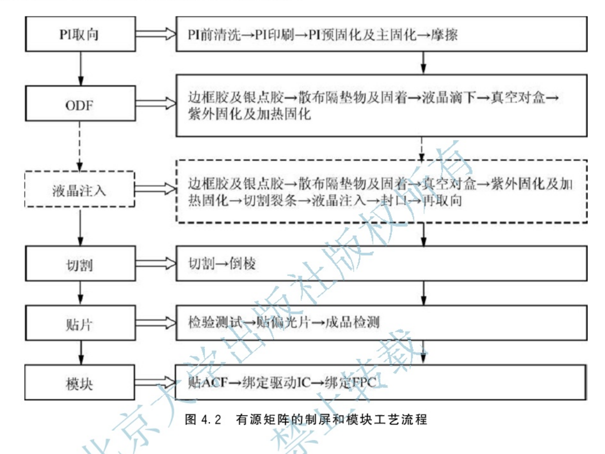


图 4.2 有源矩阵的制屏和模块工艺流程

4.2 PI 取向工艺

在液晶显示器中为使液晶分子有规律地排列，首先要在基片上涂上一层表面取向层，如聚酰亚胺、聚丙烯酸树脂、聚乙烯醇等，其中聚酰亚胺是最常用的取向材料。聚酰亚胺英文是 Polyimide，缩写为 PI。

4.2.1 PI 层的作用

PI 层有两个主要的作用：液晶分子取向和形成预倾角。

1. 取向

在玻璃内表面涂上 PI 后，经过一定的表面处理，使液晶屏内的液晶分子可以按照某个方向排列，形成取向一致的畴。向列相液晶材料接近基板表面的液晶分子通常展现出三种取向方式：平行取向，表面的液晶分子长轴方向平行于基板表面；垂直取向，表面的液晶分子长轴方向垂直于基板表面；倾斜取向，表面的液晶分子长轴方向与基板表面构成一定角度的倾斜取向，如图 4.3 所示。

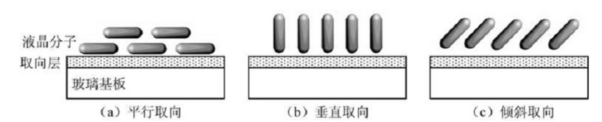


图 4.3　向列相液晶分子在取向层上的排列取向方式

2. 预倾角

取向工艺同时可以使注入的液晶分子在基板表面上形成一定的预倾角。预倾角的作用：①可以防止反倾斜，避免在外电场的作用下液晶分子向两个相反方向旋转的现象；②可以防止带状畴的发生，预倾角的大小将直接影响到显示器的对比度、阈值电压、响应时间、视角大小等特性。

液晶分子的扭曲角度越大，要求摩擦的预倾角也越大。普通的聚酰亚胺薄膜能获得的预倾角都比较小，如 90°扭曲角度的 TN 型液晶显示器，预倾角为 1°～2°。通过在聚酰亚胺分子长链中引入强极性基团或长烷基侧链，配以适当的摩擦强度，可以获得稳定的大预倾角，如 180°～270°扭曲角度的 STN 型液晶显示器，预倾角为 2°～20°。

3. PI 取向的工艺流程

PI 取向工艺包括 PI 前清洗、PI 印刷、PI 预固化及主固化、摩擦工艺。首先清洗基板，然后在 CF 或者 TFT 玻璃基板之上均匀地形成一层特定图案的 PI 膜，通过固化后形成稳定的取向层，最后经过摩擦使 PI 层具有统一的取向和预倾角。

4.2.2　PI 前清洗

PI 前清洗就是对需要印刷的基板进行清洗，除去污染物，避免对液晶显示器性能造成不良的影响。一般基板上的污染物主要来源于 ITO 膜层、TFT 阵列等制备工艺，以及玻璃基板的搬运、包装、运输、存储过程。污染物有尘埃粒子、纤维、矿物油和有机油脂等油垢、氧化铝、二氧化硅等无机颗粒、制备加工过程遗留的残留物、水迹、手指印等。随着液晶显示器制备工艺的条件越来越严格，对清除玻璃基板的污染物要求也越来越苛刻。

PI 前清洗还可以改善玻璃基板表面性能，增加玻璃基板上薄膜与 PI 材料之间的亲和力，印刷的 PI 膜有良好的附着性，获得良好的印刷效果，同时可保证工艺制作的精度极高的良品率。PI 前清洗的设备结构和工艺过程如图 4.4 所示。每一个组成部分均有很重要的作用。



图 4.4　PI 前清洗的设备结构



1. 刷洗

刷洗(Roll Brush wash)利用刷子去除玻璃基板表面的污垢。对于玻璃基板上的大于5μm的无机物颗粒去除效果非常好。一般用柔软耐磨的尼龙材料制成毛刷，每一根刷毛的直径一般在0.1mm以下。使用清洗剂，如碱性的洗剂、表面活性剂等增加清洗的效果。刷洗的设备结构及原理如图4.5所示。

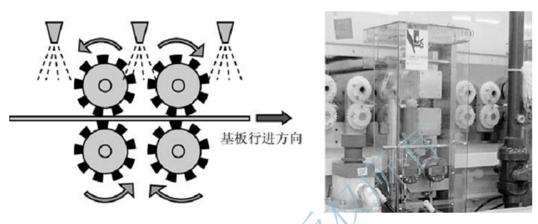


图4.5 刷洗的原理及设备结构

2. 水洗和红外线干燥

水洗(water cleaning)是用喷头喷射出超纯水，液滴喷射到运动中的玻璃基板上时，附在玻璃基板上的灰尘会在清洗液的作用下去除。在冲击波作用、振动作用、高速喷射3种作用的共同作用下，去除附着在基板上的超微小颗粒。对于1～3μm的细微颗粒去除能力很好，对粒径在0.1um的微细颗的去除率达到80%以上。水洗的过程如图4.6所示。红外线干燥(IR Oven)是干燥水洗后的玻璃基板，避免水汽对后续工艺的影响。红外线干燥设备结构如图4.7所示。

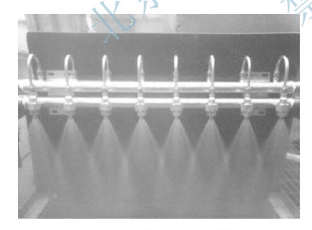


图4.6 超声水洗的过程

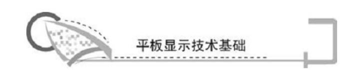


图4.7 红外线干燥设备结构

3. 紫外照射清洗

紫外照射清洗(Excimer UV)是用UV灯发出的短波紫外线进行清洗的。紫外线具有较高的能量，波长越短的紫外线能量越高。当紫外线照射到污垢上时，污垢分子吸收光能处于高能量的激发状态，发生分子内的化学键断裂而分解。同时紫外线会使得基板表面的





接触角大大降低，有利于PI的印刷。紫外照射清洗的设备结构如图4.8所示。该设备的特点是：①发光波长为172nm，发光波长短，获得的能量高；②处理中基板温度在40℃以下；③灯可以瞬时开关，电力消耗为低压水银灯的1/3；④灯的价格较高。



图4.8 紫外线照射结构

4. 冷却

冷却(cooling)是把经紫外照射清洗后40℃左右的玻璃基板的温度进一步降低，避免温度对PI印刷造成不利的影响。冷却工艺是利用氮气进行风冷，对氮气、设备的洁净度要求很高，不可以造成二次污染。设备内部的洁净度要求达到10级。

4.2.3 PI印刷

PI印刷是在基板上形成所需要的PI层。通过PI聚合物和液晶分子之间的亲和力，使液晶分子能沿着摩擦沟槽有序地排列在取向层上。常用的PI层涂布的方式是采用带有所需要的图形柔性印刷版转印的方式。印刷的工艺过程如图4.9所示。

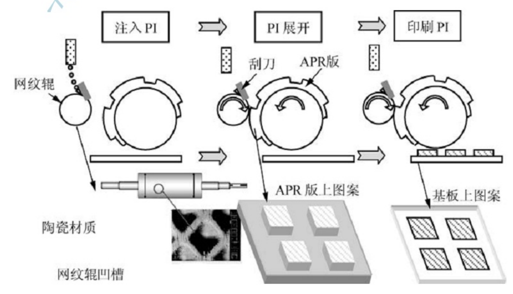


图4.9 印刷的工艺过程及部分细节



印刷过程为：①注入 PI，就是将 PI 液滴在网纹辊上，网纹辊一般采用陶瓷材质，上面有很多的凹槽；②PI 展开，就是用刮刀将陶瓷网纹辊上的 PI 液整平，同时 APR 版上的凸出物与陶瓷网纹辊挤压，凹槽内的 PI 液粘到 APR 版上；③印刷 PI，APR 版与基板接触，粘有 PI 液的图形均匀地转印到基板上，形成带有图形的 PI 取向层。PI 取向层的厚度约为 700～800Å。印刷工艺的设备结构如图 4.10 所示。

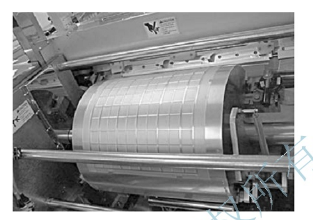


图 4.10　印刷工艺的设备结构

4.2.4　PI 预固化和主固化

PI 印刷后溶剂尚未挥发完全，PI 的分子仍是聚酰亚胺酸，还没有形成所需要的聚酰亚胺聚合物。为了挥发溶剂并形成聚酰亚胺聚合物薄膜，必须进行 PI 预固化和主固化。

预固化可以均匀地挥发薄膜内的部分溶剂，聚酰亚胺酸转变为聚酰亚胺薄膜。预固化后要检查涂布的效果，良品进入主固化，不良品进行返修重新流品。主要的不良现象有针孔或者姆拉(mura)。

主固化是完全转变为聚酰亚胺薄膜。预固化和主固化的工作温度不同，预固化通常工作在 80℃～120℃，主固化温度在 200℃～250℃左右。两者的设备结构类似，均是用热板加热玻璃基板。热板表面温度均匀性很重要，当热板的温度均匀性良好时，基板温度才能够获得均匀的加热。预固化炉热板不同位置的温度差异范围要求小于 2℃，主固化炉热板差异要求小于 10℃。固化炉的设备结构如图 4.11 所示。

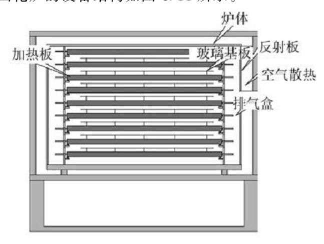


图 4.11　固化炉的设备结构



小知识：PI 膜的形成过程

在液晶显示器中，最常用的表面取向层材料是聚酰亚胺 PI，属于有机高分子材料，具有良好的高温性能、涂布性能、机械耐摩擦性能、化学稳定性等。在形成 PI 膜之前为聚酰亚胺酸，英文为 Polyimide Acid，缩写为 PIA。聚酰亚胺酸具有良好的溶解性，可以通过调整浓度和黏度来适应不同的工艺条件。经过高温固化，分子聚合反应后才会形成 PI 膜。PI 膜形成过程示意图如图 4.12 所示。

二酸酐（acid dianhydride） + 二胺（diamine） —60℃ 溶剂→ 聚酰亚胺酸（Polyimide Acid）

—印刷（或涂布） 预固化（120℃）→ 聚酰亚胺薄膜（Polyimide）

图 4.12　PI 膜形成过程

4.2.5　摩擦

在液晶显示器中，取向技术有摩擦取向、偏振紫外光诱发聚合的光取向等。其中摩擦取向是最简单最常用的取向技术。摩擦取向工艺有三步：超声(Ultra Sound，US)清洗、对位、摩擦。

1. 超声清洗

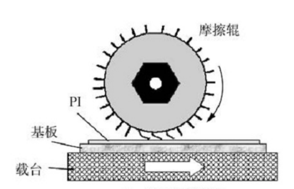
超声清洗是利用超声波振动来清洗去除基板上尘埃颗粒的过程。每片玻璃基板在摩擦之前必须经过严格地超声清洗，否则基板上存在的尘埃颗粒在摩擦的时候会造成 PI 层的划伤。

2. 对位

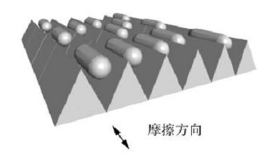
对位是根据视角的方向和扭曲角的要求调整基板确定摩擦方向的过程。

3. 摩擦

摩擦属于物理过程，是用绒布、毛毡或毛刷等以确定的方向轻轻擦拭固化完全的 PI 膜的过程。工业上一般采用细度均匀、长度均匀、毛的尖端成楔形且耐磨的纤维绒布作为摩擦布，裹在摩擦辊上。摩擦辊旋转到一定的角度后，在电机的带动下高速旋转，同时载台载着带有 PI 薄膜的基板缓慢前进，进行摩擦，如图 4.13(a)所示。摩擦工艺对整个机械设备的精度要求很高。载台在前进的过程中要保证绝对的匀速和平稳，任何微弱的振动都会导致不良品的产生。摩擦辊的转速和平稳度要求也同样很高。摩擦后在 PI 取向层上形成了一定的沟槽和一定的预倾角，如图 4.13(b)所示。摩擦的原理及设备结构如图 4.14 所示。



(a) 摩擦辊的摩擦



(b) 液晶分子沿表面沟槽的排列

图 4.13 摩擦辊的摩擦和液晶分子沿表面沟槽的排列

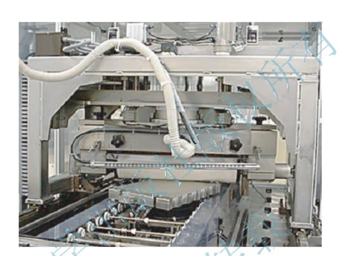


图 4.14 摩擦的设备结构

4.3 ODF 工艺

液晶滴下工艺(One Drop Filling 工艺，ODF 工艺)技术经过长时间的开发，成功应用于第 5 代的 TFT 生产线上。现在多数工厂采用的都是 ODF 工艺的制屏工艺。该工艺的液晶填充方式与传统的液晶注入方式不同，是一种新型的液晶滴下方法，适合于大尺寸、高品质的应用。

4.3.1 ODF 工艺简介

1. 工艺流程对比

ODF 工艺是用液晶滴下机滴入液晶的，可以形成均一的液晶屏。滴下液晶后，在真空中把涂布有边框胶、滴有高精度量液晶的基板和均匀散布隔垫物的基板通过高精度的对位后贴合在一起，再经过 UV 照射和加热固化边框胶、液晶再取向等工艺技术形成液晶屏。工艺流程如图 4.15 所示。

传统的液晶注入工艺是对制好的液晶盒抽真空，注入口浸入到盛满液晶的液晶槽内，再放大气，利用毛细现象的原理，灌满整个液晶盒。工艺流程图如图 4.16 所示。



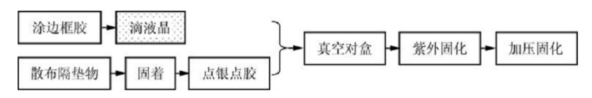


图 4.15　ODF 的工艺流程

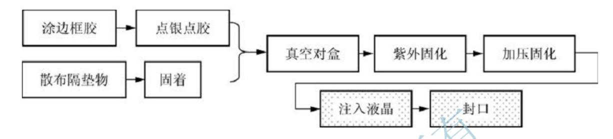


图 4.16　传统的液晶注入方式的工艺流程

2. ODF 工艺主要设备

ODF工艺的设备主要包括边框胶涂布机(Seal Dispenser)、液晶滴下机(LC Dispenser)、散布隔垫物机(Spacer Spray)、隔垫物固着炉(Spacer Cure)、银点胶涂布机(Short Dispenser)、真空对盒机(Vacuum Aligner)、UV 固化机(UV Cure)和边框胶固化炉(Seal Oven)。按照工艺流程的设备示意图如图 4.17 所示。

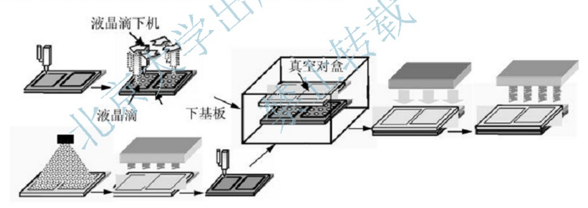


图 4.17　ODF 工艺流程的设备示意图

散布隔垫物及固着可以实现均匀地散布及固着隔垫物；银点胶可以实现上下基板的导通；边框胶能够保证液晶屏的密封性；液晶滴均匀地分布形成均一的液晶盒；真空对盒实现 TFT 和 CF 高精度对位；UV 固化和加热固化实现边框胶的固化，同时实现对液晶进行再取向。

4.3.2　散布隔垫物与固着

隔垫物散布和固着是将隔垫物(Spacer)均匀地散布于玻璃基板上并加热固着，以确保形成均一的液晶盒厚。隔垫物有两种类型：一种是球形隔垫物(Ball Spacer，BS)，如图 4.18(a)所示。球形隔垫物是液晶显示器中较早采用的隔垫物类型，具有材料成本低、稳定性高等优点，且液晶量不受隔垫物密度的影响，但是工艺产率低，抗振动能力差。



另一种是柱形隔垫物(Post Spacer，PS)，如图 4.18(b)所示。在采用高品质、大尺寸的液晶显示器中开始使用柱形隔垫物。柱形隔垫物设备成本低、工艺流程少、图像质量优良，但是材料成本高，且易产生重力姆拉。

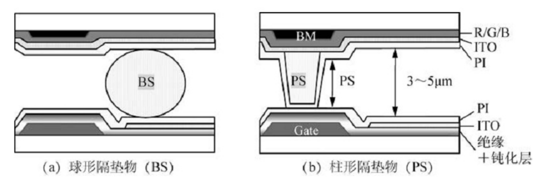


图 4.18　球形隔垫物(BS)和柱形隔垫物(PS)

1. 球形隔垫物

球形隔垫物采用喷洒的方式散布到基板上，有湿式散布和干式散布两种。湿式散布是将隔垫物均匀地分散在酒精等挥发性液体中，再喷洒到基板上，主要应用于 STN 液晶显示器制作中；干式散布是利用干燥氮气或空气散布隔垫物，主要应用于 TFT 液晶显示器制作中。球形隔垫物的干式散布系统工艺流程如下。

步骤一，进料器供给一定量隔垫物，并控制隔垫物散布量，如图 4.19(a)所示。隔垫物开封后从投料口放入进料器中，通过回转装置送至压送管口。通过调整管口和转辊的间距可以达到调整散布密度的效果。

步骤二，压送出去的隔垫物在 SUS 配管中受高速气流的作用，与管壁发生碰撞并带相同极性的静电，充分地分散开，防止结团的情况发生，如图 4.19(b)所示。

步骤三，隔垫物通过散布腔室上部的喷嘴经过“Z”字轨迹均匀地散布到玻璃基板上，如图 4.19(c)所示。

步骤四，进行隔垫物散布密度、均匀性及结团程度的检查。检查合格后的基板才能送入隔垫物固着炉进行加热固化固定到基板上。检查不合格的基板要进行返修。

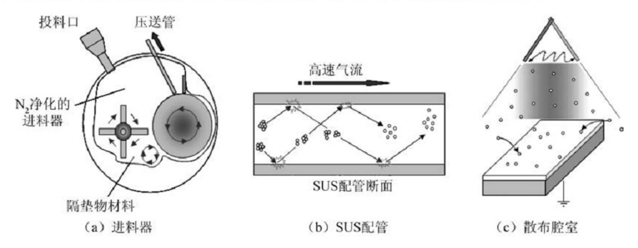


图 4.19　隔垫物喷洒的工艺过程

2. 柱形隔垫物

高质量、大尺寸液晶显示器中采用的柱形隔垫物，要检查彩膜基板上柱形隔垫物分布的面积、高度和体积。根据柱形隔垫物的高度数据控制液晶滴下的量，和判断是否与彩膜基板接触不良。柱形隔垫物的3D图片如图4.20所示。

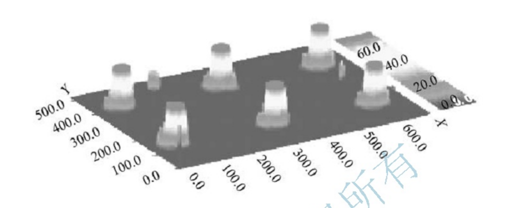


图4.20 柱形隔垫物的3D图片

4.3.3 边框胶及银点胶

边框胶和银点胶的涂布位置如图4.21所示。使用边框胶是为了使TFT基板和CF基板紧密黏合，切断液晶分子与外界的接触，并维持上下玻璃基板之间的盒厚。边框胶的主要成分为树脂，有热固化型和光(UV)固化型两种。热固化型粘着强度高，但固化时间长；光固化型粘着强度低，但固化时间短。很多生产线采用两种混合型如5代线。一般在边框胶中混合含有1%以下玻璃丝碱金属氧化物的玻璃纤维来维持液晶盒厚度，如图4.22所示。在一定氮气压力下通过与基板有固定间距的喷嘴涂布在玻璃基板上。

银点胶是一种导电胶，用于连接TFT基板和CF基板的共用电极(COM电极)，使CF基板上的ITO电极导通，主要成份为混入有导电金球，或者混入有Ag和树脂的胶。

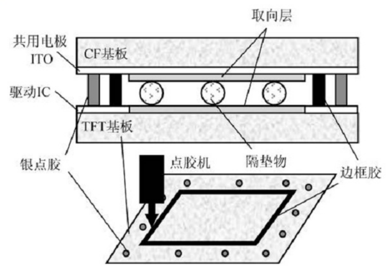


图4.21 边框胶和银点胶涂布位置

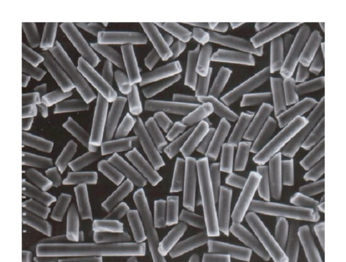


图 4.22　玻璃纤维

4.3.4　液晶滴下

液晶滴下就是在 PI 涂布和摩擦结束的阵列基板或彩膜基板上指定位置滴下一定量液晶的工艺。用液晶滴下机对液晶的吐出和滴下量进行精确的控制，控制原理如图 4.23 所示。

步骤一，阀门处于原点。

步骤二，阀门切换至填充位置，导通液晶瓶和注射器，活塞运动，将瓶里的液晶抽到注射器中。

步骤三，阀门切换至滴下位置，导通喷嘴和注射器。

步骤四，精确的步进马达控制活塞运动，行进一滴液晶量对应的行程，滴出一滴液晶，完成一个工作循环。

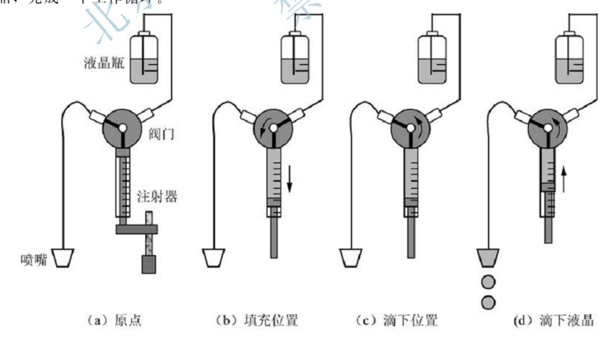


图 4.23　液晶滴下控制原理图

4.3.5 真空对盒

ODF 工艺中的真空对盒是在真空条件下对阵列基板和彩膜基板进行对准(Alignment)及重叠(OverLay)的。上下两块玻璃基板在载台上的吸附不使用传统的真空吸附方式，而是通过静电吸盘(Electrostatic Chuck，ESC)，利用库仑力的作用将两块玻璃基板固定在载台上。静电吸盘的结构示意图如图 4.24 所示。上面有交指结构的双电极，电极外面是一层聚合物薄膜，厚度约为 0.70～1.0mm。ESC 静电吸盘上面的正负电极可以与玻璃基板上面的 ITO 由于库仑力的作用相互吸附，这样基板就可以吸附在带有聚合物薄膜的 ESC 载台上了。ESC 载台的照片如图 4.25 所示。

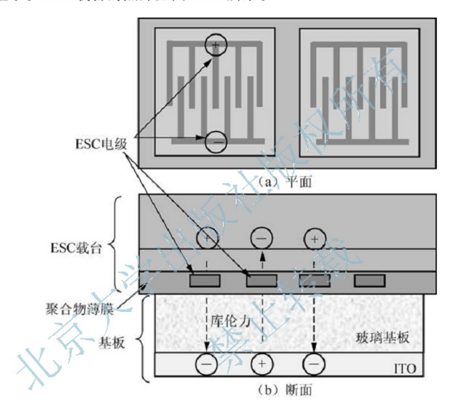


图 4.24 静电吸盘结构示意图



图 4.25 ESC 载台的照片



ESC 载台分别吸附了上下玻璃基板，抽真空后进行对准和重叠，真空度为 10^{-3} Torr。真空对盒的工艺流程如下：步骤一，粗对准上下基板，真空区域的间距为 100 ～ 200μm；步骤二，细对准上下基板，让基板几乎接触；步骤三，真空腔体内部解除真空，上基板接触静电吸附解除，上下基板重叠在一起。由于基板内部是真空的，在外部大气压力的作用下上下玻璃基板紧密贴合在一起，如图 4.26 所示。

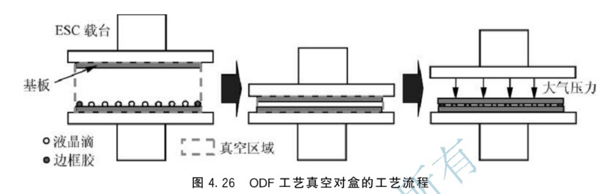


图 4.26 ODF 工艺真空对盒的工艺流程

4.3.6 紫外固化和加热固化

固化包括紫外固化和加热固化，分别对边框胶固化，保证很好地密封两片玻璃基板并紧密地粘接起来。紫外固化时采用的紫外光会对液晶、取向膜、TFT 产生不良影响，因此在照射时需要在制品基板和 UV 光之间加 UV 掩膜板，保护液晶屏显示区域不受 UV 光的照射，只在边框胶的部分留开口让 UV 光通过，如图 4.27 所示。紫外固化使用发射平台倾斜紫外扫描的方法固化，固化面积扩大，固化的可靠性高，减少液晶的污染。边框胶热固化是将基板加热到封框胶的固化温度让液晶超过清亮点，从而达到边框胶热固化和液晶再取向的双重目的。

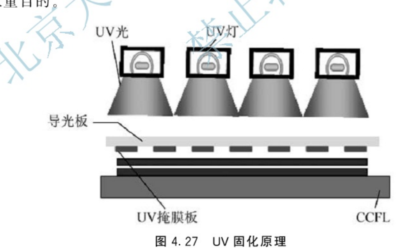


图 4.27 UV 固化原理

4.4 传统的液晶注入工艺

4.4.1 真空对盒

在传统的液晶注入工艺中，真空对盒是将涂有边框胶的基板和散布有隔垫物的基板在



真空中经过对位后贴合在一起，设备结构如图 4.28 所示。

上下两片基板通过机械手臂送入设备中，由上下基板台吸着控制住。关闭真空腔室，上基板台静电吸盘加电压开始抽真空。接着进行粗对位和微对位。微对位完成后，上基板台下降进行贴合，贴合时的压力由设备来控制，一旦接触后关闭基板台静电吸盘的电压，进行大气开放。最后进行 UV 点照射，以防止在搬送过程中发生基板的错位。

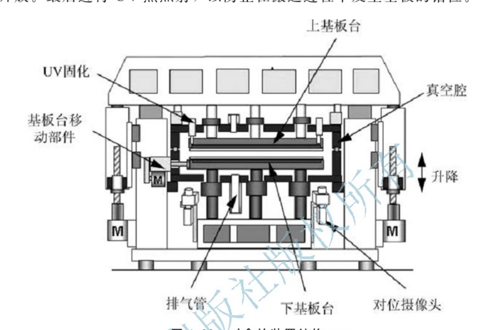


图 4.28　对盒的装置结构

4.4.2　**液晶注入**

在传统的液晶注入方式中，液晶面板上形成很多粒液晶屏。在液晶注入前，需要通过切割工艺分离成单个或者一列液晶盒，如图 4.29 所示。切割是利用高渗透刀轮以一定的压力和速度切割玻璃基板。

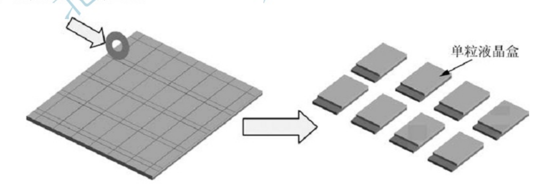


图 4.29　切割的目的

液晶注入是在真空的状态下将液晶利用毛细现象的原理注入液晶盒内。有两种方法：针头式注入及浸泡式注入。针头式注入是将空盒抽真空后，用针头粘上液晶置放在封口处，使液晶完全覆盖封口处，之后通过气压将液晶充入盒内。该种方式液晶用量节省，适用于封口小的产品，但注入时容易产生气泡。

浸泡式注入是将空盒放置在注入室抽真空，盒中的空气被抽出，使注入口接触液晶，



再向真空室内充气，液晶在外界气压作用下被充入空盒内，如图 4.30 所示。液晶用量多，适用于任何大小的封口，注入液晶时产生气泡少。

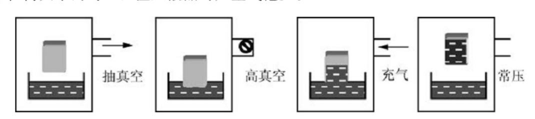


图 4.30　浸泡式液晶注入的原理

4.4.3　封口

注入完液晶的液晶屏要用封口材料将注入口封堵住。封口工艺有两种：一种是加压封口，让液晶盒内的液晶受热膨胀或受压力从盒内排出一少部分的液晶，然后点封口胶，让胶少量收缩再将胶固化，如图 4.31(a)所示。其设备复杂，但盒的均匀性好。另一种是减压封口，先用封口胶把封口封住。然后冷冻使液晶收缩，让封口胶恰当地收缩入封口内，再通过光或热的作用使其本身发生化学交联或聚合作用，形成牢固的封口。其操作简单，成本低，但盒均匀性差，如图 4.31(b)所示。

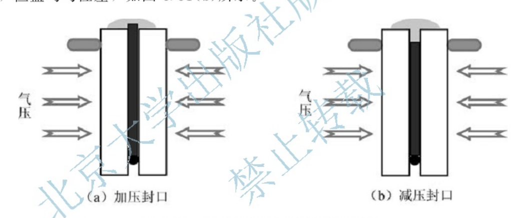


图 4.31　传统液晶注入方式的封口方法

4.4.4　再取向

液晶屏注入液晶之后通常液晶的排列取向达不到要求，需要进行再排列，称为再取向。将液晶盒放入加温箱内，在一定的温度下保持一定时间(如 30 分钟)，依靠加热使液晶分子之间相互作用而调整液晶分子指向矢的排列状态，最后实现液晶屏内液晶分子按摩擦方向整齐规则地排列。

4.4.5　ODF 与传统液晶注入方式的比较

1. *液晶填充原理*

传统的真空液晶注入方法利用的毛细现象和内外压力差将液晶注入盒内。液晶注入时间很长，盒厚越窄，液晶流动阻力越大，注入越困难；而 ODF 工艺利用的液晶滴填充的方法时间短、效率高。

2. 成盒方式

传统的真空液晶注入成盒采用热压方式，液晶屏受加压封口的影响大；热压时隔垫物变形量大，高温下的恢复率低，对玻璃基板的反作用力小，如图 4.32(a)所示。ODF 工艺，真空对盒时不加热，液晶屏的压缩率主要取决于液晶滴的量，隔垫物能够跟随着变形，但对玻璃基板的反作用力大，如图 4.32(b)所示。

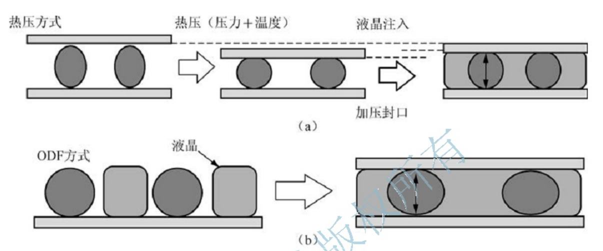


图 4.32 传统的液晶注入工艺与 ODF 工艺的成盒区别

3. 封口和再取向

传统的液晶注入方式，注入后必须要进行封口才能把液晶密封在液晶屏内；而 ODF 方式的液晶滴下方式不需要注入口，对边框胶热压直接把液晶密封在液晶屏内。

传统的液晶注入方式，为达到再取向的目的往往在封口后再放入加温箱内再取向；而 ODF 方式的液晶滴下方式，边框胶热固化过程同时起到了再取向的作用。

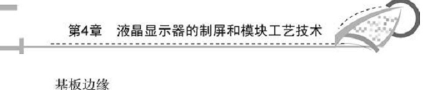
总之，ODF 工艺与传统液晶注入工艺原理不同，在产品性能及成本上有很大差别，见表 4-1。

表 4-1 ODF 工艺与传统液晶注入工艺的对比

项目	液晶滴下(ODF)工艺	传统液晶注入工艺
成本	液晶利用率高，设备及动力投入降低	液晶材料浪费多
工艺	工序减少一半，生产时间缩短	脱泡容易，高真空注入工艺复杂
产品	液晶用量精确，盒厚均匀，可以更薄，不受面板尺寸、取向膜性质限制	液晶污染小，边框胶接触强度高，玻璃的收缩/膨胀，导致错位
其他	实现全线的自动传送	全线自动化传送困难，不良反馈慢

4.5 切割工艺

在 LCD 制造工艺中切割工艺包括切割和倒棱。作用有：①去除短路环；②去除棱角处的玻璃毛边的细小裂纹，使玻璃的强度均匀；③棱角光滑，组装模块时边缘不易破损，且不会使柔性电路等造成划伤或破损，如图 4.33 所示。



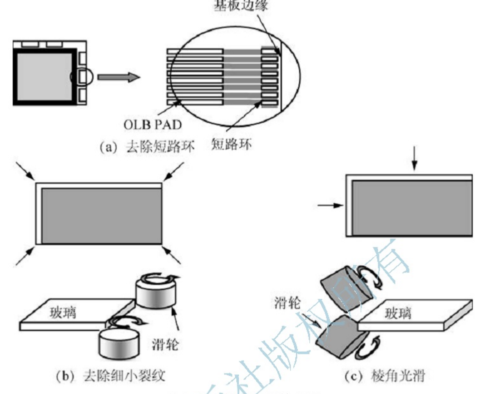


图 4.33 切割工艺的作用

切割就是利用高渗透刀轮以一定的压力和速度切割玻璃基板，在 C/F 和 TFT 贴合后的屏指定位置露出 PAD 电极，形成一个个独立的液晶屏。高渗透刀轮接触玻璃，使玻璃产生裂纹。由于玻璃压缩力的作用产生了肋状裂纹(Rib Mark)，然后在玻璃内部张力作用下裂纹向下延伸产生平直的垂直裂纹(Median Crack)和水平裂纹(Lateral Crack)，垂直裂纹生长到基板厚度的 80%～90%使玻璃断裂。

切割后要进行倒棱。倒棱就是待加工的屏吸附在工作载台上，随着载台的移动与高速旋转的滑轮进行接触研磨。主要研磨玻璃基板的台阶处，防止产品在后续生产和使用过程中对外部连接物或人员造成伤害。研磨轮共有 4 个，向内移动分别研磨产品的边的 4 个上下面(可设定选择需要研磨的面)；研磨后，转向 90°，研磨另外两边的 4 个上下面。

4.6 贴片工艺

贴片工艺就是在切割后的液晶屏外面要贴上偏振片，包括清洗、贴片、加压消泡等工艺。

4.6.1 清洗

清洗是在倒棱后和贴偏振片前，用摩擦带和去离子喷射水对面板上下表面自动清洗，用风干装置吹干。去除液晶屏表面残留的脏污，胶体、玻璃碎屑、纤维、颗粒等异物。洗净后的屏表面无脏污，不会残留超过 30μm 的研磨粉粒或异物，且无划伤、刮痕和水滴等，保证后续贴偏光片的质量。清洗机主体部分主要由：传送滚轴、研磨带部分、高压喷淋部分、最终冲洗部分、风刀等单元组成，如图 4.34 所示。

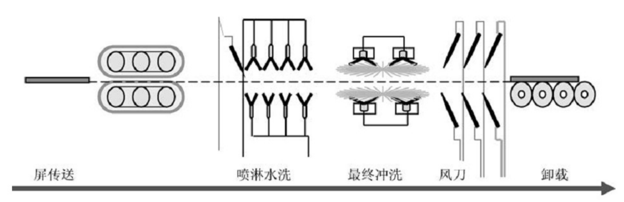


图 4.34　清洗设备结构示意图

4.6.2　贴片

贴偏振片是液晶显示器制屏工艺的最后一个阶段，包括成品检测、贴偏振片和包装等。

成品检测包括光台检验和电测图形检验。光台检验是目视检查液晶盒外观质量。根据液晶的旋光特性，在两片相互垂直(或平行)的偏光片之间形成的亮场(或暗场)，通过检验人员的肉眼观察来检查产品的质量，从中挑出内污、指印、漏气、取向差、封口污染等废品的过程。电测图形检验是对液晶显示器加上交流驱动的电压信号，观察实际显示状态是否合格正常的过程。检查合格的液晶盒要贴偏光片。将偏光片贴附液晶屏上下面起偏光作用，使自然光变成线偏振光。

偏光板贴附机是用滚轮自动完成贴附和自动剥离偏光板的保护膜，如图 4.35 所示。外污和气泡发生率要降到最低，发生外污或其他坏品时用独立偏光板返工机进行返工。

在液晶盒两面贴上偏光片，完整的液晶显示屏就制成了。

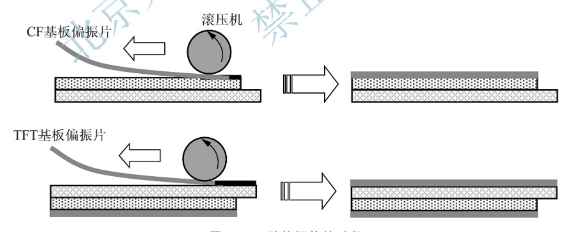


图 4.35　贴偏振片的过程

4.6.3　加压消泡

贴片完成后，偏光片和玻璃基板之间有微小气泡，要利用设备消除小气泡，同时增加偏振片的粘附性，如图 4.36 所示。用特殊的工具将贴完偏振片的液晶屏磙压一下或用加压设备进行加压处理，消除偏光片与玻璃之间的气泡。加压消泡的过程是将贴片后的玻璃

基板放入密闭的环境(通常是锅炉状腔体),利用高压(5kgf/cm²)并加一定的温度(50℃左右)维持一定的时间(20～40 分钟)可以消除小气泡,还可以增强玻璃面板与偏光片间的粘附性。

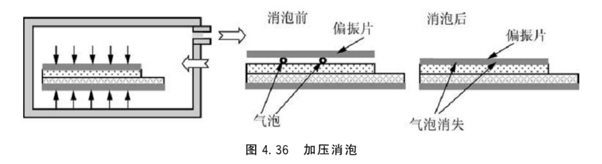


图 4.36 加压消泡

4.7 液晶显示器的模块工艺简介

液晶显示器在完成了制屏工艺后,还需要绑定驱动电路等部件才能实现显示。将液晶屏、驱动电路、柔性线路板(FPC)、印刷电路板(PCB)、背光源、结构件绑定组装在一起的工艺称为液晶显示器的模块工艺,又称为模组工艺。根据绑定驱动 IC 方式的不同,液晶显示模块工艺又可以分为:COB 工艺、TAB 工艺、COG 工艺和 COF 工艺。



小提示:模块工艺常用英文缩写的含义

COB:Chip On Board,驱动 IC 绑定在印刷电路板上。
TAB:Tape Automated Bonding,窄带驱动 IC 自动绑定。
COG:Chip On Glass,驱动 IC 绑定到基板上。
COF:Chip On Film,驱动 IC 绑定到柔性线路板上。
ACF:Anisotropic Conductive Film,各向异性导电胶膜。
FPC:Flexible Printed Circuit,柔性线路板(是 PCB 的一种)。
PCB:Printed circuit Board,印刷电路板。
TCP:Tap Carrier Package,带载封装包。

4.7.1 COB 工艺

COB 工艺是一种将驱动 IC 的裸芯片用粘片胶直接贴在 PCB 板指定位置上的模块工艺,如图 4.37 所示。通过焊接机用铝线将液晶屏的外引线与 PCB 板电极焊接起来,再用黑胶将液晶屏电极与铝线封住固化,实现液晶屏电极与 PCB 板电极之间的机械连接。该工艺包含有粘片、固化、压焊、测试、封胶、固化和测试等工序。COB 工艺采用小型裸芯片,设备精度较高,用以加工线数较多、间隙较细、面积要求较小的 PCB 板。芯片焊压后用黑胶固化密封保护,使焊点及焊线不受到外界损坏,可靠性高。但损坏后不可修复,只能报废,在液晶显示模块工艺中逐步被代替。

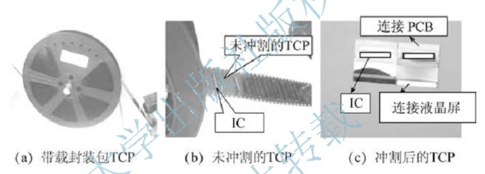
4.7.2 TAB 工艺

TAB 工艺是将封装有驱动 IC 的柔性电路 TCP 的两端用各向异性导电胶 ACF 分别固



图 4.37　绑定 IC 的 PCB 板

定在印刷电路板 PCB 和液晶屏上，把两者连接起来的一种模块工艺，又称为窄带驱动 IC 自动绑定技术。在传统的液晶显示器中，液晶屏与驱动 IC、PCB 的连接大多使用 TAB 工艺的连接方式。封有驱动 IC 的柔性电路板称为 TCP，呈胶卷状，又称为带载封装包，如图 4.38 所示。TCP 是一种集成电路的封装形式。



(a) 带载封装包TCP　(b) 未冲割的TCP　(c) 冲割后的TCP

图 4.38　带载封装包 TCP、未冲割的 TCP 及冲割后的 TCP

TAB 工艺主要包含 ACF 热压、冲割、对位检查、热压粘接、焊接和检测工序，如图 4.39 所示。TAB 工艺流程是：①ACF 热压，在 TCP 的一侧用一定温度、压力、时间内热压上一层各向异性导电膜 ACF；②冲割，将卷盘上的 TCP 一个个分离冲断；③热压粘接，将切下来的 TCP 通过 ACF 热压粘接到液晶屏基板的外引线电极端；④焊接，将 PCB 的电极端热压上一层 ACF，然后将 PCB 焊接到 TCP 的另一端。

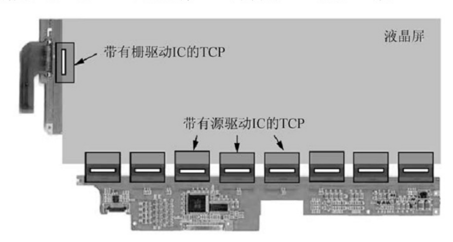


图 4.39　采用 TAB 工艺的液晶显示模块



TAB 工艺可减小液晶显示模块的重量、体积，安装方便、可靠性较好。但液晶屏的外引线连接处容易受损断裂，造成液晶屏与驱动 IC 的连接处接触不良。

4.8 COG 工艺

COG 工艺是采用各向异性导电薄膜 ACF 和热压焊工艺将精细间距的驱动 IC 直接绑定到液晶屏上的工艺，是比 COB 和 TAB 工艺更先进的工艺技术，具有绑定工艺简便、易于小型化等特点，特别适用高密度、大容量的液晶显示模块。COG 工艺适用于 STN-LCD、彩色 STN-LCD 及 TFT-LCD，具有广阔的发展前景。

4.8.1 COG 工艺连接原理

COG 工艺中驱动 IC 粘贴到液晶屏外引线很小的面积上，输出端与液晶屏的外引线电极直接相连，输入端与电极焊盘(Pad)左端连接，并用黑胶将驱动 IC 封住固化。柔性线路板(FPC)的左端与连接电极焊盘的右端、印刷电路板 PCB 与 FPC 的右端通过热压连接在一起。结构示意图和实物照片如图 4.40 所示。

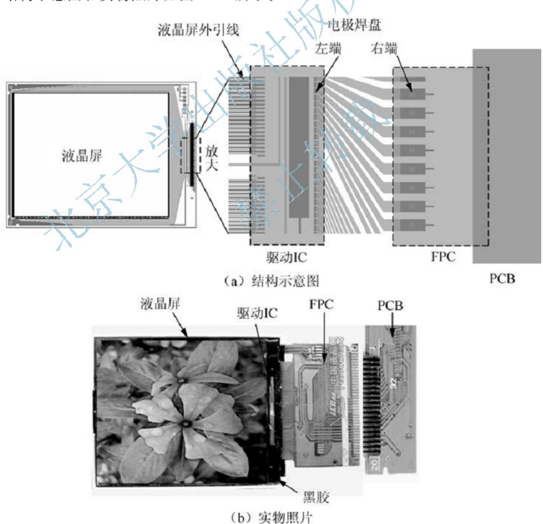


图 4.40 结构示意图和实物照片

COG 工艺中各种连接组件是依靠各向异性导电胶膜(ACF)连接起来的。各向异性导电胶膜是将细微的金属粒子(镍 Ni、焊剂等)或外部镀有金属的塑料小球的导电粒子分散在树脂粘着剂材料中，并以薄膜形式存在的一种胶膜，可当作双面胶看待。

ACF 有热固化型，还有热可塑型。将 ACF 粘贴在要导通的电极和电极之间，在适当的压力、温度、时间下聚合物树脂开始流动，导电粒子则夹在组件电极与电极之间起导通的作用。由于导电粒子的粒径大小一定和添加量有限，电极和相邻的电极之间无法接触绝缘不导通，原理如图 4.41 所示。其具有在垂直方向导电，而在水平方向绝缘的性质。ACF 的压合温度低于 200℃，工艺简单，产率高，绿色环保。

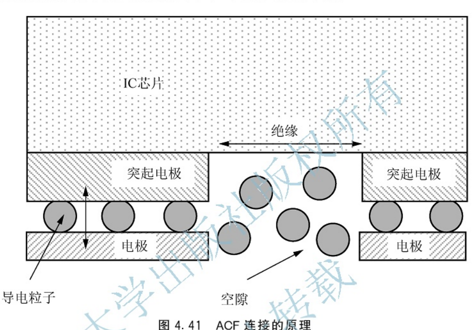


图 4.41　ACF 连接的原理

4.8.2　COG 工艺流程

首先将 ACF 贴在液晶屏的外引线处提供导通和黏合的作用，接着绑定驱动 IC，如图 4.42(a)所示；再贴 ACF，绑定 FPC，如图 4.42(b)所示。贴 ACF，绑定印刷电路板 PCB，如图 4.42(c)所示。这样 ACF 把驱动 IC、FPC 和 PCB 通过导电粒子导通，从而让电流信号导通；ACF 在一定的温度、压力下控制压合时间，聚合硬化提供足够的工作强度。

各组件绑定完成后进行检测。检测绑定过程中压合的好坏，同时要检测玻璃基板厚度、尺寸、平坦度等项目，检查玻璃的外观上是否有刮伤、阴影或表面上是否有任何的变化。还要用钠灯进行显色性色差检查，检查是否有彩膜正反面的不均匀性姆拉(Mura)，如图 4.42(d)所示。

经检测绑定合格的模块要组装上背光板、背光源及铁框等，如图 4.42(e)所示。最后进行老化测试及成品检测。老化测试的目的是检查液晶屏可能性的故障，一般经老化测试后通过的液晶屏在寿命期间就不可能再出现问题了。出于效率考虑，液晶屏面板很薄，稍有不慎将破碎，因此老化测试要使用自动设备来提高良品率。

成品检测是通过人眼目视检测。用一组信号发生器直接驱动液晶屏显示图像，进行 20 多组画面的检查，主要检查是否有坏点、RGB 三基色是否正常，如图 4.42(f)所示。最后在恒温恒湿机内部，LCD 显示屏要经过边发光边接收检查的温度湿度检测及耐压抗撞击测试。



图 4.42 模块工艺流程

4.8.3 COG 工艺技术要点

COG 产品多为高密度产品，液晶屏与驱动 IC 连接处布线较密，要求 COG 的加工精度要足够高。液晶屏外引线的 Pitch 值(线宽加线间距)一般在 50μm 以下，IC 接口线一般在 40μm 以下。目前，国内已有部分厂家液晶屏的 Pitch 值控制在 20μm，意味着外引线或线间隙的加工精度已达到 10μm 左右。

为满足高精密产品的要求，COG 工艺要满足以下条件。

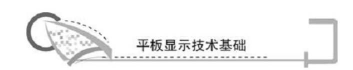
(1) 绑定驱动 IC 时，要求 IC 对位标志与液晶屏上的对位标志吻合。

(2) 需用无尘布沾溶剂清除液晶屏外引线上的异物，再用紫外灯照射清除外引线上的有机物。

(3) 要注意 ACF 的储存条件、有效使用时间、热压温度和压头的压力。ACF 从冰箱中取出后需在室温条件下放置 1 小时后使用。

(4) 液晶屏需严格测试，必须严格控制外引线处的断路和短路，防止废品漏测造成材料浪费及品质不良。





（5）COG 工艺在外引线的线间隙小于 15μm 时，要增加涂覆绝缘层工艺，以避免短断路、显示不均、串扰和功耗电流大等问题。

（6）COG 成品必须 100%检测，COG 常见不良品有：IC 异物、IC 压痕不良、ACF 贴附不良、IC 对位偏移、IC 厚度不均、IC 破裂/刮伤、IC 突出电极不良等都需要检测出来。

4.8.4 COG 工艺的特点

（1）COG 工艺直接将驱动 IC 芯片绑定到液晶屏上减少了焊接工艺，工艺简化，不存在驱动 IC 芯片变形的问题。

（2）体积比 COB(Chip On Board)大大缩小，更易于小型化、简易化和高度集成化。

（3）该工艺将柔性印刷电路 FPC 也直接绑定到液晶屏上，可广泛用于体积小的便携式产品。

随着便携式信息显示正向低工作电压、低功耗、轻薄、小型化、彩色显示方向发展，COG 工艺技术近年来得到了前所未有的发展。手机、PDA、MP3、手表、数字电话、智能电话、笔记本用显示屏等便携式应用产品越来越多，在驱动 IC 生产商及液晶显示器生产商的共同推动下，COG 工艺今后将会是驱动 IC 与液晶屏的主要绑定技术。

4.9 COF 工艺

COF 工艺是将驱动 IC 绑定到一个柔性电路板上，再用 ACF 将柔性电路板连接到液晶显示屏的外引线处，其他周边组件也可以高度集成的方法与驱动 IC 一起绑定在柔性电路板上，是一种新兴技术。

4.9.1 COF 的结构

COF 的结构类似于单层板的柔性电路板 FPC，是驱动 IC 的一种封装技术，如图 4.43 所示。在基层的聚合物薄膜上配制上铜线电路构成的柔性电路板作为驱动 IC 的载体。通过热压把驱动 IC 上的金凸块与柔性线路板上的铜线电路进行绑定连接起来。外面涂上绝缘的填充材料保护驱动 IC，增强 IC 的强度。COF 使用的铜线很细、很薄，其柔韧性远优于 FPC。

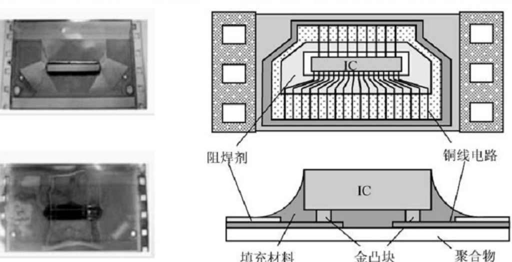


图 4.43 COF 的结构示意图



4.9.2　COF 工艺流程

COF 工艺完整的模块结构如图 4.44 所示。用各向异性导电胶 ACF 把液晶屏外引线和带有驱动 IC 的柔性电路板 COF 的外引脚连接起来。内引脚可以采用传统的焊接方式，或者插头方式连接到控制信号的印刷电路板上。其他周边组件采用回流焊接的方法焊接到 COF 上。

COF 的工艺流程为：用浇注法制作无胶柔性铜箔层压板、制作精细线路、涂覆焊接层、焊盘镀 Ni/Au、安装驱动 IC、回流焊接周边无源组件、绑定液晶屏等工艺。其中难度最大的工艺是制作精细线路和安装驱动 IC。

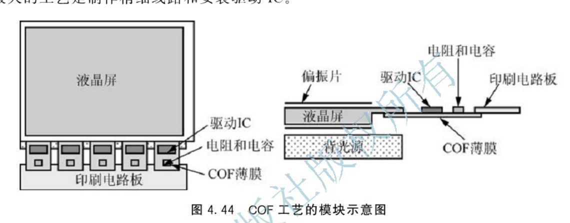


图 4.44　COF 工艺的模块示意图

1. 制作无胶柔性铜箔层压板

在 TAB 工艺中，采用的是传统的 3 层有胶柔性铜箔层压板，中间层为改性环氧或者丙烯酸粘接剂，耐热性和尺寸稳定性不好，且粘接剂中的离子杂质使线路间的绝缘电阻降低，无法满足高精度布线的要求。

在 COF 工艺中，大多采用的是两层无胶柔性铜箔层压板，仅采用聚酰亚胺膜和铜箔两层结构，中间没有粘接剂，具有可靠性高、尺寸稳定、绝缘电阻稳定、耐热性和耐化学腐蚀性高的优点，产品更轻、更薄。

2. 制作精细线路

随着驱动 IC 上的线间距减小和输入输出线数的增加，对柔性线路板上的精细线路图形的要求也在增加。引线的线宽从 2001 年的 22.5μm 发展到 2005 年的 15μm，这种趋势仍在持续下降。COF 工艺中制作精细线路的方法有 3 种：减层法、半加层法、加层法。

减层法是传统的柔性电路制作方法，就是在铜箔上涂上光刻胶，然后通过曝光、显影、刻蚀、去胶形成所需要的线路图形，工艺流程如图 4.45(a)所示。由于铜箔偏厚，伴随着侧向刻蚀以及光刻胶分辨率和光刻胶散射的影响，使得减层法制作的线宽极限在 20μm。要获得更细的线宽，必须降低铜箔的厚度，缩短刻蚀时间，减小侧向刻蚀，无疑增加了工艺的难度。

半加层法采用 5μm 厚的薄铜箔作为衬底材料，也可以采用常规的铜箔通过刻蚀减薄后作为衬底材料。采用同减法层的光刻工艺后，增加一层金属电镀层，称为图形电镀，然后再去胶和刻蚀，工艺流程如图 4.45(b)所示。半加层法避免了由于光刻胶过厚导致的光线散射对线路图形的不良影响，能制作出 20μm 以下的线宽，是一种比较有前途的方法。

加层法是在聚酰亚胺的绝缘衬底上直接加工而成的电路图形，工艺流程如图 4.45(c)所示。①聚酰亚胺制作到金属箔衬底上，用溅射的方法制作一层 Cr/Cu 薄膜，Cr 薄膜的作用是增加聚酰亚胺层和铜层之间的附着力，防止铜层在后面工艺加工中脱落；②涂胶、曝光、显影后形成光刻胶图形；③蒸镀 Cu/Ni/Au 后去胶，形成 Cu/Ni/Au 图形；④湿法刻蚀 Cr/Cu 薄膜图形。加层法可以制作出线宽为 3μm 的线路，并且可以运用厚的光刻胶把线路的厚度做大，抑制线路过细，电阻增大的问题。但工艺复杂，设备成本高。

(a) 减层法

(b) 半加层法

(c) 加层法

图 4.45 制作精细线路的工艺流程

3. 安装驱动 IC

安装驱动 IC 是 COF 工艺中一个关键的工艺，主要有 3 种连接方式：金一锡共晶连接工艺、各向异性导电胶(ACF)连接工艺、非导电胶连接工艺。

金一锡共晶连接工艺就是将驱动 IC 芯片上的金凸块与柔性电路上镀有锡的内引线通过加热加压法接触，在接触面上形成金一锡的共晶体实现连接的目的。其温度较高(325℃～330℃)，现在采用较多的是 400℃，容易出现短路或者漏电，适用于线宽 20μm 以上的连接。

各向异性导电胶(ACF)连接工艺是将ACF贴于驱动IC的金凸块和柔性线路板之间导电连接的，仍然是COF工艺中主要的连接方式。

非导电胶连接工艺是利用树脂硬化收缩实现驱动IC和柔性线路电极的直接接触，达到电路导通的作用的。采用高温短时间固化的材料，如20s，150℃～250℃，利用树脂硬化后的机械性质维持电极间接触导通所需要的压迫力量。该工艺要求驱动IC芯片的金凸块高度的平整性非常好，限制了该工艺的使用。

4.9.3　COF工艺的特点

现今的电子产品，尤其是手携式产品，越来越趋向于向体积小、重量轻、功能多等方向发展。新的材料及模块工艺技术也不断推陈出新，COF工艺就是在这个基础上发展起来的。非常适用于小尺寸面板，如手机或PDA等液晶显示产品的应用。

1. 轻薄短小

COF工艺在COG工艺和TAB工艺的基础上将液晶屏的驱动IC直接绑定到柔性电路板上，具有重量轻、柔韧度好、集成度高、可微细化、高量产以及高稳定的特性；非常薄，衬底厚度仅为0.02mm，重量轻，适合便携使用；能使带背光源的液晶显示模块厚度降为4.5mm甚至更薄；柔韧的材料，能弯折180°，以及卷对卷的生产特性，设计灵活性更高，是其他传统的模块工艺所无法达成的。随着COF材料和设备的商业化，毋庸置疑，COF将成为便携显示器的未来之星。

2. 适应于更大的分辨率

现在液晶显示器的多种模块工艺中，COG及COF工艺能够做到体积较小、重量较轻。受到液晶屏布线的限制，COF工艺的驱动IC芯片不占据液晶屏面积，同样大小的面板在COF工艺要比COG工艺更适合高分辨率的显示，如图4.46所示。

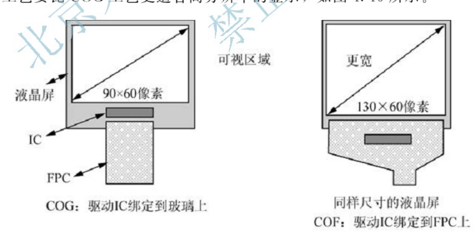
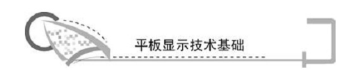


图4.46　COF工艺比COG工艺更适合高分辨率的显示

3. 线间距很细

COF工艺与传统的窄带驱动IC自动绑定的TAB工艺非常相似。由于TAB工艺要制作悬空引线，在目前线间距非常细、高引线密度的情况下，这种极细的悬空引线由于强度不够很容易变形甚至折断。COF工艺没有这方面的问题，可以将线宽及间距做到非常精细，可以做到35μm的线距(pitch)。



4. 节省空间

COF 工艺的驱动 IC 及周边组件都直接绑定在柔性线路板上，可节省 PCB 或者 FPC 的空间及厚度，成本也低，能承受回流焊接。设计时温度补偿或调压器等周边组件可随意安放在模块上。此外，输入线数大大减少了。

总之，COF 工艺除了可以连接液晶屏外，还可以承载驱动 IC 和周边组件，使产品更加轻薄。目前 COF 技术已经成功应用到手机、笔记本等液晶显示产品中，很快将成为未来市场的主流。COF 工艺解决了 COG 工艺在绑定中造成玻璃基板变形、难返修的困难；并且解决了 TAB 工艺采用 3 层有胶基板，柔韧性和稳定性差的问题，很可能成为取代 TAB 工艺和 COG 工艺的下一代模块工艺。产品也会从手机等小尺寸发展到各种大尺寸上，甚至应用到等离子体面板和未来的有机发光显示中。另外，在 COF 工艺中可以在柔性电路板上绑定不止一个驱动 IC 芯片，进一步提高封装密度。卷带式生产方式，可以大幅度节约成本，提高产率，减少人为操作误差，使 COF 生产迈上一个新台阶。

本章小结

液晶显示器可以分成有源矩阵和无源矩阵两大类。本章从制作方法上重点讲述了制作一个完好的液晶屏的制屏工艺流程、技术方法及设备原理，同时讲述了将液晶屏、驱动电路、柔性线路板(FPC)、印刷电路板(PCB)、背光源等组件绑定组装在一起的模块工艺流程、技术方法及设备原理。

1. PI 取向工艺

在液晶显示器中为使液晶分子有规律地排列，要在彩膜基板和阵列基板上形成均匀的一层表面取向层，最常用的取向材料是聚酰亚胺(PI)。经过摩擦使 PI 层具有统一的取向和预倾角。该工艺包括 PI 前清洗、PI 印刷、PI 预固化及主固化、摩擦工艺。

2. ODF 工艺

液晶滴下(One Drop Filling，ODF)工艺是一种新型的液晶填充方式。使用液晶滴下机滴入液晶可以形成均一的液晶屏。滴下液晶后，在真空中把涂布有封框胶、滴有高精度量液晶的基板和均匀散布隔垫物的基板通过高精度的对位后贴合在一起，再经过 UV 照射和加热固化边框胶、液晶再取向的一项工艺技术。ODF 工艺利用的液晶滴填充的方法，时间短、效率高。

3. 传统的液晶注入工艺

传统的液晶注入方法工艺利用毛细现象和内外压力差将液晶注入盒内，液晶注入时间很长。盒厚越窄，液晶流动阻力越大，注入越困难。先制作液晶屏空盒，再对制好的液晶盒抽真空，注入口浸入到盛满液晶的液晶槽内再放大气，利用毛细现象的原理，灌满整个液晶盒。

4. 切割工艺和贴片工艺

切割工艺就是将液晶屏指定位置露出电极，切割形成一个个独立的液晶屏，并且进行倒棱形成棱角光滑的液晶屏。最后在液晶屏的外面贴上偏振片的工艺。

5. COB 工艺和 TAB 工艺

液晶显示器在完成了制屏工艺后，要组装成模块。根据绑定驱动 IC 方式的不同，液晶显示模块工艺又可以分为：COB 工艺、TAB 工艺、COG 工艺和 COF 工艺。

COB 工艺是一种将驱动 IC 的裸芯片用粘片胶直接贴在 PCB 板指定位置上的模块工艺，由于损坏后不可修复，只能报废，在液晶显示模块工艺中逐步被代替。

TAB 工艺是将封装有驱动 IC 的柔性电路 TCP 的两端用各向异性导电胶 ACF 分别固定在印刷电路板 PCB 和液晶屏上连接起来的一种模块工艺。在传统的液晶显示器中，液晶屏与驱动 IC、PCB 的连接大多使用 TAB 工艺的连接方式。

6. COG 工艺

COG 工艺是采用各向异性导电薄膜 ACF 和热压焊工艺将精细间距的驱动 IC 贴直接绑定到液晶屏上的工艺，是比 COB 和 TAB 工艺更先进的工艺技术，工艺简便、易于小型化等特点，特别适用于高密度、大容量的液晶显示模块，具有广阔的发展前景。

7. COF 工艺

COF 将驱动 IC 绑定到有一个柔性电路板上，再用 ACF 将柔性电路板连接到液晶显示屏的外引线处。其他周边组件也可以高度集成的方法与驱动 IC 一起绑定在柔性电路板上，是一种新兴的模块工艺技术。目前 COF 技术已经成功应用到手机、笔记本等液晶显示产品中，很快将成为未来市场的主流。

本章习题

一、填空题

1. PI 层有两个主要的作用：________和________。

2. 向列相液晶材料接近基板表面的液晶分子通常展现出 3 种取向方式：________、垂直取向和________。

3. 常用的 PI 层涂布的方式采用________方式。

4. ODF 工艺中的真空对盒采用的是________的作用将两块玻璃固定到载台上的，上面有________双电极。

5. 切割工艺包括________和________，其作用有：①去除________；②去除棱角处的________，使玻璃的强度均匀；③________。

6. FPC 是________板，PCB 是________。

7. 安装驱动 IC 是 COF 工艺中一个关键的工艺，主要有 3 种连接方式：金—锡共晶连接工艺、________、________。其中________仍然是 COF 工艺中主要的连接方式。

8. COG 工艺直接将________绑定到液晶屏上，减少了焊接工艺，工艺简化。

9. COG 工艺中 FPC 和液晶屏电极间依靠________连接起来。

10. 在液晶屏工艺中，________可以防止液晶分子的反倾斜。

二、判断题

1. 有源矩阵电极都作在阵列基板一侧，彩膜基板上的 ITO 只是共用电极，在整个基板上是一个完整的 ITO，没有图形光刻工艺。　（　　）



2. PI印刷后，溶剂尚未挥发完全，PI的分子仍是聚酰亚胺酸，还没有形成所需要的聚酰亚胺的聚合物。（　　）

3. TAB和COF工艺类似，采用的都是传统的3层有胶柔性铜箔层压板。（　　）

4. COG及COF工艺都能够做到体积较小、重量较薄。但COG工艺要比COF工艺更适合高分辨率的显示。（　　）

5. 在COG工艺中，FPC和PCB之间是依靠液晶屏上的电极连接起来的。（　　）

6. 在COG工艺中驱动IC的一端与液晶屏相连，另一端与FPC相连。（　　）

7. 各向异性导电胶具有水平方向导电，垂直方向不导电的特点。（　　）

8. ODF工艺，真空对盒时不加热，隔垫物能够跟随着变形，对玻璃基板的反作用力大。（　　）

9. 浸泡式注入是利用毛细现象的原理注入液晶的。（　　）

10. 银点胶是一种导电胶主要成分是混入有导电金球，或者混入有Ag和树脂的胶。（　　）

三、名词解释

制屏工艺、模块工艺、COB工艺、TAB工艺、COG工艺、COF工艺、再取相、倒棱

四、简答题

1. 简述ODF的工艺流程。
2. 简述隔垫物的种类及优缺点。
3. 简述传统的液晶注入方式的工艺流程。
4. 简述银点胶和边框胶的作用。
5. 简述ACF的作用。
6. 简述COF的结构。
7. 简述COF工艺特点。
8. 简述COG工艺的连接原理。
9. 简述取向工艺的作用。
10. 简述PI膜的形成过程。

五、计算题与分析题

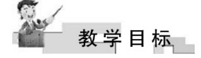
1. 描述采用ODF工艺的制屏工艺流程。
2. 用对比的方法描述ODF与传统液晶注入方式的主要差别。
3. 为什么COF工艺具有轻薄短小的特点？
4. COF工艺和COG工艺哪种更适合高分辨率显示？为什么？

六、思考题

1. 你认为哪种模块工艺会成为市场的主流？为什么？
2. 哪种模块工艺更适合制作精细线路？为什么？
3. 为什么ODF工艺更适合5代线以上的生产线？

第5章 有源矩阵液晶显示器的结构

有源矩阵液晶显示器根据有源器件种类的不同又可以分为很多种，其中薄膜晶体管有源矩阵液晶显示器具有高清晰度、高分辨率、可以实现全彩色显示等特点，是当今时代的主流，主要用于智能手机、笔记本计算机、液晶电视等。本章以薄膜晶体管有源矩阵液晶显示器为例，从组成的结构出发，介绍几种主要的组成部件，背光源、彩膜和阵列基板的材料、结构、特点和作用，并从驱动原理上介绍有矩阵液晶显示器的优点及成为当今时代主流的原因。



- 了解有源矩阵液晶显示器的结构；
- 了解背光源的种类及特点；
- 掌握彩膜的结构及作用；
- 掌握阵列单元像素的结构；
- 了解液晶显示器的驱动原理。



知识要点	能力要求	相关知识
有源矩阵液晶显示器的结构	（1）掌握有源矩阵液晶显示器的结构 （2）了解各部件的作用及材料的种类	液晶材料的性质
CCFL 和 LED 背光源	（1）了解背光源的种类 （2）掌握背光源的结构和特点	LED 基础
玻璃基板	了解玻璃基板的种类及性能要求	
彩膜	（1）了解彩色显示的原理 （2）掌握彩膜的基本结构和工艺流程	阵列的工艺技术
阵列的单元像素	（1）了解单元像素的结构 （2）掌握单元像素的等效电路	电路元件的基础
液晶显示器的驱动原理	（1）了解段码式显示及驱动原理 （2）掌握无源矩阵的驱动及交叉串扰产生的原因 （3）掌握有源矩阵的驱动原理	电路的基本原理



推荐阅读资料

[1] David J. R. Cristaldi. Salvatore Pennisi. Francesco Pulvirenti. Liquid Crystal Display Drivers[M]. Springer，2009.

[2] Yue Kuo. Thin Film Transistors-Materials and Processes[M]. New York：Kluwer Academic Publishers，2004.



基本概念

有源矩阵液晶显示器：Active Matrix liquid crystal display，缩写为AMLCD，是在液晶显示器的每一个像素上配置一个二端或三端的有源器件，独立控制每个像素的开关，可以实现高质量图像显示的液晶显示器。



发现故事：液晶显示器的发展

从1968年5月，美国RCA公司在纽约召开的液晶显示器新闻发布会震撼了世界。但实现液晶显示器的实用化并不容易，更别提制造液晶电视了。当时的液晶在直流驱动下使用不到1小时显示就会消失，寿命和可靠性都很差。但随着技术的不断进步和发展，到今天液晶显示器经历了4个时代，如图5.1所示。

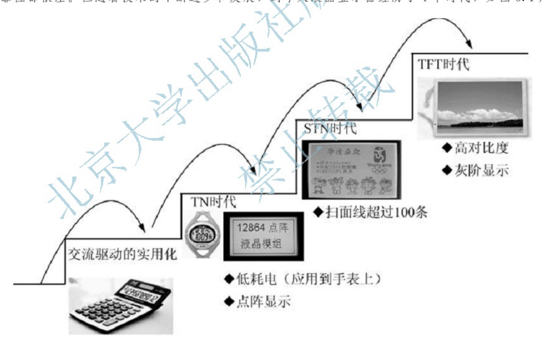


图5.1　液晶显示器的发展

1973年夏普公司采用动态散射模式(DSM)的液晶，在液晶材料中加入离子性杂质，采用交流驱动获得良好的显示特性，解决了稳定性和寿命的问题，制作出全球首款液晶应用产品——小型计算器，进入到交流驱动的实用化时代。但是DSM实现点阵显示方面困难，存在扫描线数量的限制。

1971年瑞士H. Roche公司制作出第一个扭曲向列型液晶显示器(TN-LCD)，可以实现点阵显示，用ITO行列电极交叉处控制光的开/关，扫描线数量大大增加，使液晶显示器真正实用化为TN时代。但TN-LCD的扫描线数增加到60条左右图像就会发生变形。日立制作所的川上英昭最初找到原因并提出了解决方案。

1982年，英国皇家信号与雷达研究院(RSRE)发明了超扭曲向列型液晶显示器(STN-LCD)，进入到STN时代。在1985年，瑞士的BrownBoveri公司(BBC)试制出扫描线数量达到135条的STN-LCD。但是即使引入了STN模式，对比度较低、很难显示细微灰阶的问题，还是很难制造液晶电视的。

1979年，英国邓迪大学试制出非晶硅TFT之后开始了大规模的TFT研究，进入到TFT时代。1986年，3英寸非晶硅TFT彩色液晶电视上市。1988年，夏普公司推出14英寸非晶硅TFT的彩色液晶电视，证实了实现大屏幕显示的可能性。有源矩阵液晶显示器有效地避免了交叉串扰现象，可以显示高对比度和精细灰阶的画面，使液晶显示器真正成为时代的主流。

5.1　有源矩阵液晶显示器的结构

采用薄膜晶体管作为开关器件的有源矩阵液晶显示器称为薄膜晶体管有源矩阵液晶显示器。在每个像素上都有薄膜晶体管(Thin Film Transistor，TFT)作为开关器件，独立控制一个小的TN型液晶显示器(TFT liquid crystal display，TFT LCD)。薄膜晶体管是一种以半导体薄膜制成的绝缘栅场效应晶体管。TFT LCD由阵列基板、彩膜基板、液晶屏部分、驱动IC和周边组件部分，以及背光源组成，基本结构如图5.2所示。与无源矩阵液晶显示器不同的是，在下玻璃基板上增加了薄膜晶体管开关器件组成的矩阵部分。

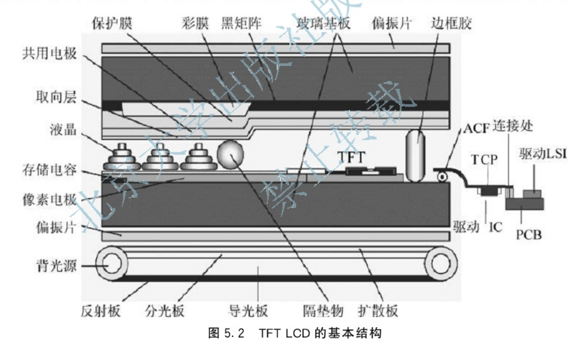


图5.2　TFT LCD的基本结构

5.1.1　组成部件介绍

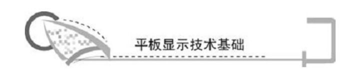
1. 背光源

背光源用来给TFT LCD提供光源，是决定显示器亮度的关键部件，由多个特性不同的部件如冷阴极灯管、反射板、分光板、导光板和扩散板等组成。

2. 彩膜基板

TFT LCD有两块玻璃基板组成，其中一块玻璃基板是彩膜基板，是有规律整齐排列彩膜和黑矩阵的玻璃基板。彩膜基板上包含彩色膜、黑矩阵、保护膜、ITO共用电极。





3. 阵列基板

TFT LCD的另一块玻璃基板上有规律整齐排列薄膜晶体管称为阵列基板。每一个像素都由一个薄膜晶体管TFT、存储电容和像素电极组成。

4. 液晶屏部分

在阵列基板和彩膜基板制作完成后，两块基板要对盒制成液晶屏。在断面结构中可以看到液晶材料、取向层、隔垫物、偏振片。

TFT LCD对液晶材料的性能要求更高、更严格。不仅要求液晶材料具有良好的光、热、化学稳定性，高的电荷保持率和高的电阻率，还要求液晶材料具有低黏度、高稳定性、适当的光学各向异性和阈值电压，很多高档TFT LCD的液晶材料都需要进口。

两块玻璃基板表面涂敷的取向层是用来控制液晶分子的取向排列的。隔垫物是用来控制液晶屏的厚度的。偏振片是用来形成偏振光控制光的透光率的。

5. 驱动IC和周边组件部分

随着TFT LCD发展模块工艺不同，连接的模块组件也不同。如采用的TAB模块工艺(窄带驱动IC自动绑定)，TFT LCD周边连接的模块组件主要有驱动IC、驱动LSI(Large Scale IC，大规模集成电路)、TCP(带载封装包)、PCB(印刷电路板)。TCP一端通过ACF(各向异性导电胶膜)与液晶屏引线电极相连接。TCP的另一端与PCB板连接，连接处可以采用ACF连接，也可以采用直接焊接。

5.1.2 液晶显示器的材料

在液晶显示器中可以把制作液晶显示器所使用的材料分为直材和间材两种。在最终产品中所保留的原材料称为直材。有源矩阵液晶显示器结构中的玻璃基板、彩膜、液晶、偏振片、取向层、边框胶、隔垫物、背光源都是直材，还有银点胶、封口胶、制作电极的靶材等都是直材。

在最终产品中不保留的原材料称为间材。主要的间接材料有刻蚀液、显影液、去胶液、光刻胶、洗剂、气体、陪片、带电防止剂、PI稀释剂、摩擦布、异丙醇、乙醇、丙酮、清洗剂、酸、碱等。

5.2 CCFL背光源

液晶显示器本身不能发光，要用背光源作为光源，利用液晶的电光效应实现显示。背光源在一定程度上决定了液晶显示器的视觉效果。随着液晶显示器向着越来越轻、越来越薄、大尺寸、低价格的发展，背光源也需要满足轻量化、薄型化、低耗电、高亮度及降低成本的市场要求。液晶显示器要显示色彩丰富的优质图像，能够最大限度地展现自然界的各种色彩，要求背光源的光谱范围要宽，且接近日光色。

液晶显示器的背光源按光源类型主要有冷阴极荧光灯(CCFL)、发光二极管(LED)及电致发光片(EL)3种背光源类型。目前，对于笔记本计算机及主流的液晶电视，一般采用光谱范围较好的冷阴极荧光灯作为背光光源。一些新型白光LED背光源、EL背光源发展十分迅速，垄断了小屏幕液晶显示器市场，并已开始向大屏幕液晶显示器背光源延伸。

5.2.1 CCFL 发光原理

冷阴极荧光灯(Cold Cathode Fluorescent Lamps，CCFL)是一种气体放电发光器件，其构造类似常用的日光灯，以冷阴极和超细管径为主要特征。灯管内部充有惰性气体和微量汞，并在玻璃管内壁涂有荧光粉。

发光原理是在两端电极上加高电压时电极开始放电。电极发射的电子激发汞原子电离，形成紫外辐射光和足够大的电流。紫外辐射光再激发管壁上的荧光粉涂层发出可见光。

5.2.2 CCFL 背光源的结构

CCFL 背光源由于是管状光源，使用时必须转换成面光源荧光灯或者形成片状荧光灯。为获得均匀的光，背光源由冷阴极灯管、导光板、反射板、扩散板、棱镜组、灯管反射罩、外框架构成，结构如图 5.3 所示。但冷阴极灯管的亮度损失较大。

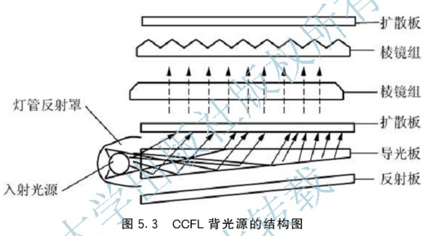


图 5.3 CCFL 背光源的结构图

5.2.3 CCFL 背光源的种类

根据光源分布位置不同分为直下式和侧置式。直下式背光源就是在液晶屏的后面并排排列 CCFL。早期的 TFT-LCD 背光源中，为了获得足够亮度，大部分采用多灯管直下式的方式。大屏幕显示器的液晶电视也常采用直下式结构，可以获得更高亮度和更高的发光效率，如图 5.4(a)所示。

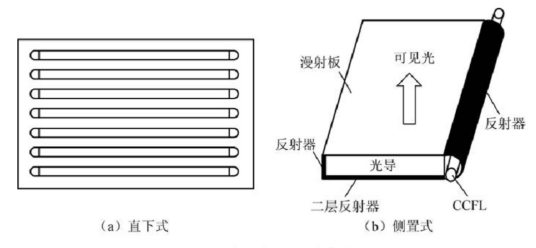


图 5.4 直下式和侧置式背光源

为降低液晶屏的厚度渐渐采用侧置式。侧置式背光源就是在液晶屏的边缘排列CCFL，其中有单边背光源，还有双边和四边背光源。笔记本计算机和计算机显示器用的背光源多数都是侧置式，其结构如图5.4(b)所示。光损失较大、亮度较差，通过在导光板上增加了提高散射能力的散射图案，大大提高了光源的利用率。

5.2.4 CCFL背光源的特点

CCFL背光源具有灯管细小、结构简单、表面温升小、表面亮度高、显色性好、发光均匀、价格低、易加工成各种形状(直管形、L形、U形、环形等)等优点，广泛应用于大多数液晶显示器中，主流的液晶电视的背光源采用也是CCFL背光源，但也有很多缺点。

1. CCFL不是平面光源

CCFL属于管状光源，为了实现背光源均匀的亮度输出，光均匀散布到面板的每一个区域，需要为液晶屏的背光模组搭配扩散板、导光板、反射板等众多辅助器件。结构复杂，厚度也较难控制，而且随着面板的增大，必须使用多条光源。

2. CCFL亮度和色域不足

CCFL要获得如CRT的均匀的亮度是很困难的。大部分液晶屏在显示全白或全黑画面时，屏幕边缘和中心亮度的差异十分明显。在图像显示效果上，CCFL的液晶显示的色域表现还是明显不足的。对大多数传统液晶面板来说，能够覆盖的色彩范围只有NTSC标准的65%～75%，具体表现为在绿、黄、红色彩区域，与标准值差别较大。

3. CCFL功耗大

CCFL发光效率低、放电电压高、低温下放电特性差、加热达到稳定时间长。采用CCFL背光源的液晶电视功耗也比较大，且CCFL中含有有害金属，不符合环保要求。

4. CCFL寿命较短

绝大多数CCFL背光源在使用2～3年后亮度下降非常明显，许多液晶电视在使用几年后会出现屏幕变黄、发暗的现象，是由于CCFL寿命短性能逐渐衰减造成的。

5. CCFL超薄化困难

采用CCFL背光源的液晶面板体积无法再进一步缩小，超薄化困难。

5.3 LED背光源

为了解决CCFL背光源给液晶电视带来的问题，众多液晶电视厂商一直在寻找一种更为优秀的液晶背光源，而LED背光源技术就应运而生了。

LED背光源是基于液晶显示器背光源技术的改善，将CCFL背光源用发光二极管LED代替。LED是Light Emitting Diode(发光二极管)的缩写，是一种由p型和n型半导体组成的半导体器件。当对pn结施加正向电压时，电流会从LED的阳极流向阴极，少数与多数载流子在扩散区内进行复合，能量以光能释放出来使LED发光。

LED在20世纪60年代开始出现，在现实生活中随处可见。例如，路边的广告牌、家用电器上的各色指示灯等大都是采用了LED作光源，而作为背光源技术在显示器产品上的应用则是一种新技术。



随着技术的不断发展与LED光源的日趋成熟，厂商们开始将LED背光源应用到显示市场中。据奥维咨询(AVC)数据显示，2011年LED背光源的液晶电视产品在商用市场的渗透率已达20%，其中37英寸以下的中小尺寸LED电视渗透率达25%，40英寸以上的大尺寸渗透率为11%。本节重点以LED背光源的液晶电视来说明LED背光源的特点和发展。

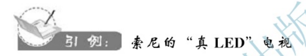
资讯：2012年2月28日，三星正式宣布将不会再在中国市场内出售CCFL背光源的液晶电视，以后销售的全线液晶电视产品都将配备LED背光源，标志着LED全面取代CCFL背光源的液晶电视时代很快就要到来。

5.3.1 概念的区分

LED电视：常见的LED电视是一种采用了LED背光源的液晶电视，它实质上还是液晶显示器的一种，与传统的CCFL背光源的液晶电视相比仅仅是背光源种类的不同。

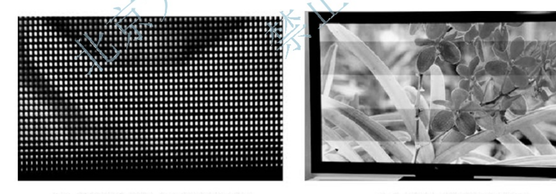
LED显示：是一种将数个小LED点阵拼接排列组合起来的显示系统。如大家熟悉的大型演唱会的LED屏幕、室外广告的LED屏幕、火车站的电子时刻表的LED屏幕等，清晰度要差很多，与LED背光源的液晶电视不是一种技术。

真LED电视：每个像素都由RGB 3种颜色的LED自发光体组成，一个个做到像素级大小的LED点阵式电视，是完全不同于液晶显示器的一种真LED电视，又称为晶体LED显示(Crystal LED Display，CLD)。



索尼的“真LED”电视

索尼在CES2012上所发布的机型“Crystal LED Display”就是采用了像素级大小的LED点阵式的真LED电视。这款CLD电视在55英寸上实现了600万个LED发光颗粒的点阵式排布，制造工艺十分高超，如图5.5所示。目前是索尼公司大力开发的下一代显示技术。



(a) 600万像素级大小的LED点阵　　(b) 55英寸的真LED电视

图5.5 索尼公司的真LED电视(www.pconline.com.cn)

5.3.2 LED背光源的结构

LED具有光电转换效率高、彩色饱和度高、体积小、耐振动、耐冲击、不含有毒物质、低压供电、对人体安全、寿命超长等优点，可发出从紫外到红外不同波段、不同颜色的光线，为LED在显示领域的应用奠定了基础。LED背光源主要有LED光源、导光扳、扩散板、光学膜片、驱动电路(PCB)、塑胶框等组成。结构示意图如图5.6所示。

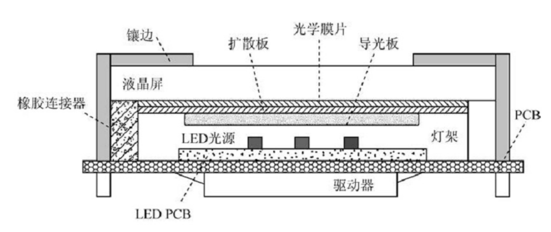


图 5.6 LED 背光源的结构示意图

5.3.3 LED 背光源的种类

LED 背光源从颜色上可分为白光 LED 和 RGB-LED(红绿蓝 3 色 LED)两种。从安装方式分有直下式、侧置式 LED 两种。

1. 白光 LED

白光 LED(White LED, WLED)背光源采用能发出白色光的 LED 光源代替原来的 CCFL 荧光管。结构与 CCFL 背光源基本一致，主要差别是，CCFL 是线光源，而 LED 是点光源。优点是：结构简单、亮度可动态调节、容易实现区域控制、对比度很高。由于白光 LED 不涉及背光源的调光，在电路结构方面要求不高。但在成本上比 RGB-LED 背光源低。缺点是：在色彩显示特性方面上不如 RGB-LED 电视，一般只能达到 NTSC 色域的 70%左右。

2. RGB-LED

RGB-LED 背光源是诞生时间比较早的一种技术。RGB-LED 背光源的位置和以往的 CCFL 相比变化并不大，仍然在液晶屏正后方。在外观上和普通 CCFL 液晶电视没有很明显的差异。通过红色、绿色、蓝色三基色 LED 调制成白光，具有很好的光学特性。

RGB-LED 背光源的优点是：①高色彩表现力，由于采用了 RGB 三原色独立发光器件，能实现广色域，色域范围能达到 NTSC 的 120%以上，部分经过良好调整的机型甚至可以达到 150%左右，完全达到或者超越了等离子电视的水准，满足数字电视、大屏幕高清晰度电视色域的要求；②高动态对比度，RGB-LED 电视可以支持背光区域调光技术，亮度调节更容易实现，对比度能够达到千万：1 级，提高了电视的图像质量。RGB-LED 背光源的缺点是：成本高；需要单独的调光电路和更好的散热结构；结构复杂，难以做到轻薄化。

3 种颜色组合时，由于每种颜色的 LED 在发光效率上存在一定差异。根据彩色电视亮度方程：$Y=0.30R+0.69G+0.11B$，在合成标准白色时，绿色光所占的比例多。因此，三基色 LED 不是完全按照 1∶1∶1 的数量组成的，而是要采用 1 个红色 LED、1 个蓝色 LED 和 2 个绿色 LED 组成。图 5.7 给出了索尼公司改进后的 RGB-LED 微结构示意图。

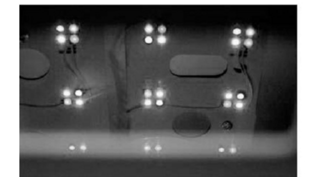
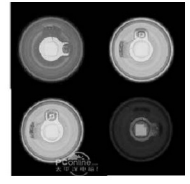



图 5.7　RGB－LED 结构(www.pconline.com.cn)

3. 直下式 LED

直下式 LED 背光源是在液晶面板下直接放置 LED 背光组件，可以使液晶电视的背光亮度更为均匀，直接照射获得更高的亮度，如图 5.8 所示。直下式与 RGB 三色 LED 背光源的成本都很高。直下式 LED 背光技术还衍生出一个很强大的区域调光技术。

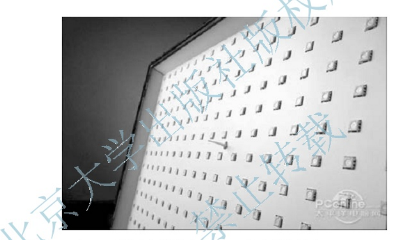


图 5.8　直下式 LED 液晶电视的白色 LED 背光源组件(www.pconline.com.cn)

小知识：区域调光技术

区域调光技术(local dimming)是将 LED 灯分为多个灯组，根据显示画面的明暗来控制不同区域灯组的明暗，降低局部暗画面区域的 LED 背光亮度来提高对比度的技术。该技术使得液晶屏幕拥有了类似 AMOLED 自发光屏幕所拥有的高对比度的优势，如图 5.9 所示。

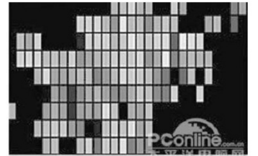



图 5.9　区域调光技术(www.pconline.com.cn)



引例： 2007 年 SID 展会上三星采用区域调光技术

韩国三星电子在 2007 年采用区域调光技术制作了全球最大尺寸 70 英寸 LED 背光源的全高清高画质的液晶电视，其对比度提高到 50 万：1，耗电量降低 50%。通过高速 LED 扫描模式，解决了大尺寸液晶电视常见的闪烁及拖尾问题。

许多旗舰机型品牌，如夏普 X50A 的“煌彩”技术、东芝 X1000C 的 512 区精确调光、索尼 HX920 的智能精锐 LED 背光源都采用了区域调光技术。东芝推出的 X2 系列液晶电视，官方宣称其动态对比度达到了 900 万：1。目前直下式 LED 的局域调光技术还不够完善，最多也就是 512 个分区的区域控制，相对全高清屏幕的分辨率而言 512 分区还是相差甚远。在显示物体边缘过于复杂、明暗对比强烈时就会出现光晕的现象。

4. 侧置式 LED

侧置式 LED 背光源技术在不断地提高，亮度与均匀性方面与直下式 LED 背光源差距也逐渐减小。目前能看到的机型中 95%以上都是侧置式 LED 背光源，是多数厂商常用的 LED 背光源。在画质上没有超越 CCFL 背光源液晶显示器，但它轻薄的外观与较高的亮度是非常吸引人的。

侧置式 LED 被业界称为第三代 LED 背光技术，将 LED 背光源放置在电视的边框位置，大都紧挨液晶面板排列，非常节省空间。采用白光 LED 作为背光源，通过结构和特殊材料的应用，在提高了色域和对比度性能的同时，机身厚度大幅度下降，可以做到超薄型。直下式和侧置式 LED 背光源的对比如图 5.10 所示。目前市面上能够看到的三星的 LED 电视和索尼的侧置式 LED 电视都主打纤薄的外观。

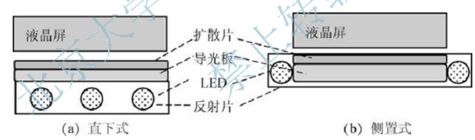


图 5.10 直下式 LED 背光源和侧置式 LED 背光源对比

侧置式 LED 的缺点：①必须使用特殊的导光板，侧置式 LED 发出的光并不像白光 LED 和 RGB-LED 背光源一样直接穿过液晶面板，必须使用特殊的导光板，导光板不仅具有改变光线传播方向的功能，还要能够尽量均匀地将光线分散开，否则电视图像将出现严重的边缘亮、中间暗的现象；②区域调光困难，侧置式 LED 的位置在液晶面板的侧面不是在液晶面板的正后方，难以实现背光源的区域调光，这也是侧置式 LED 电视需要解决的一个技术难题。

5.3.4 LED 背光源的优势

1. 更轻薄

采用 LED 背光源的电视厚度比 CCFL 背光源电视要轻薄一些，尤其是采用侧置式 LED 背光源的电视。

2. 光衰期长

LED 光衰期较 CCFL 更长，会长一倍左右。CCFL 背光源每年以 7%的速度递减，使液晶电视在使用 2～3 年后亮度会明显地降低，光色变暗，平均寿命在 2～3 万小时。LED 的平均寿命可以达到 5～6 万小时，与液晶面板的寿命近似，省去了更换背光源的麻烦。LED 光源结构简单，对于环境的耐受度较好。

3. 效率高，耗电少

传统液晶电视的 CCFL 背光源在原理上与白炽灯比较接近，必须要靠稳定的高电压来保证。因此，液晶电视的几百瓦功率在很大程度上是用于背光源的。LED 拥有更高的发光效率，工作电压相对低很多，节电效果明显。如 42 寸液晶电视采用 LED 背光源工作功率约 60W，采用 CCFL 背光源工作功率要高于 150W。在实现同样亮度的情况下，比 CCFL 的耗电量要小很多，最多情况下可减少 30%～50%的能耗。屏幕越大效果越明显。

4. 色域广

显示色彩中 CCFL 液晶电视的色域窄，不如等离子和 CRT 图像还原准确、色彩真实。采用 RGB 三色 LED 背光源的液晶电视可以轻松达到大于 105%的 NTSC 色域，如图 5.11 所示。有些研发的高端产品可以达到 150%色域轻松赶超 CRT。而 CCFL 无论是加入磷还是增加发光波长都达不到这个色域。

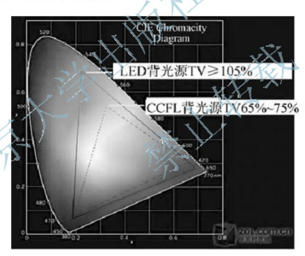


图 5.11 LED 超广色域(www.zol.com.cn)

5. 环保

CCFL 背光灯管在制造中必须要加入汞，是剧毒物质，虽然在使用中不会挥发，一旦搬运过程中发生碰撞使得背光灯损坏，对人身的伤害和环境的污染是相当大的，而且在电视“报废”后回收也是一件很麻烦的事。LED 通过半导体发光，对环境和节省资源的负面影响自然小很多。

5.3.5 LED 背光源技术的发展趋势

1. 减少 LED 背光源颗粒

随着 LED 背光源技术的逐渐成熟，近几年开始大规模引入电视市场，在提高 LED 背



光源产品覆盖率的同时，也尽量降低成本。LED背光源的液晶电视降低成本上所作的努力有：首先是采用较高发光效率的LED颗粒，大幅度降低LED颗粒的使用数量，并且采取双颗粒封装的方式降低系统成本；其次是简化结构，将过去主流的直下式变成侧置式结构，从而进一步降低LED颗粒的使用数量，来降低成本；最后是使用一定数量的增亮膜。

LED的发光效率以每年20%～30%以上的速度提升，因此背光源中LED颗粒数将减少到30%，从而降低成本。以一台40英寸的LED背光源液晶面板为例，说明LED背光源的技术发展。当采用直下式LED背光源时，需要960粒LED；效率提高后，数量减少到30%，这时需要960×30%＝288粒。当采用侧置式LED背光源时，需要8条LED灯条(Light bar)，所需LED数量为288粒，并采用双颗粒封装的方式，成本将大大降低；到2010年，由于采用更为高效的LED和更新的设计，其颗粒数将减少到192粒，灯条将下降为4条，并采用节能的区域调光技术来降低能耗和提升图像对比度。表5-1为大尺寸液晶电视的LED背光源的技术革新进程。

2. 廉价直下式LED背光源

侧置式LED背光电视将LED颗粒放置在面板侧面，通过导光板将LED发出的光均匀扩散至一整块液晶面板；直下式LED是将LED颗粒直接放置在液晶面板后部。为了进一步节省成本，一种新型的直下式LED背光系统开始崭露头角。

新型的直下式LED背光系统直接在面板后部采用了LED颗粒与高效率扩散板，省去了导光板。虽然LED数量多导致的成本上比侧置式LED要多两倍，但没有使用导光板，整体成本还是降低了15%。为了使数量不多的LED颗粒均匀发光，虽然省去了导光板，但增加了扩散板，这种LED背光电视的厚度与一般CCFL差不多。在性能和成本竞争时，厂商优先考虑的还是降低成本，相信这种的廉价LED背光源的液晶电视将会大量上市。

表5-1 大尺寸液晶电视的LED背光源的技术革新进程(www.verydtv.net)

时间/年	2008	2009	2010
LED类型	直下式	侧置式	先进的侧置式
LED布局	点阵	边缘灯条(×8)	边缘灯条(×4)
LED样式			
LED芯片(40″)	960	576(120Hz)	384(120Hz)
LED数量(40″)	960	288	192
区域调光	0D及2D调光	0D及1D调光	0D及1D调光
导光板	PC扩散板	PMMA厚导光板	PMMA厚导光板
光学薄片结构	扩散板、反射片、DBEF、扩散板	DBEF、棱镜、微镜头、导光板	DBEF、棱镜、微镜头、导光板

注：DBEF(Dual Brightness Enhancement Film)增亮膜，属于回复反射式偏光板。

5.4　玻璃基板

玻璃基板是目前液晶显示器使用的主要材料，在液晶显示器领域占有相当重要的地位。玻璃的种类有：碱玻璃、低碱玻璃、无碱玻璃。不同种类的液晶显示器使用不同种类的玻璃，见表5-2。

表5-2　液晶显示器用的各种玻璃基板的特征和用途

	碱玻璃	低碱玻璃	无碱玻璃
化学成分(碱含量)	15.5	7.0	0
软化点/℃	510	535	593～667
热膨胀率/($\times10^{-7}$/K)	2.49	2.36	2.49～2.78
生产方法	浮法	浮法、拉伸法	熔融法、对辊压延法、拉伸法、浮法
用途	无源矩阵	有源矩阵	有源矩阵(如TFT)

无源矩阵液晶显示器制造工艺的温度方面要求不高，从成本角度考虑使用的是类似窗玻璃等的碱玻璃。碱玻璃的断面呈青绿色，又称青板玻璃，在应用到显示上时多半加上阻挡层SiO_x膜。无源矩阵液晶显示器也有用无保护膜的低碱玻璃。

有源矩阵液晶显示器制造工艺的要求很高，因此使用的玻璃基板是无碱玻璃，同时要满足如下要求。

(1) 耐热性高，制作工艺过程中温度较高，要求耐热性高、热稳定性高的玻璃基板。

(2) 不含离子源的无碱玻璃，玻璃基板中钠离子等的渗透污染会引起薄膜晶体管的性能下降，因此要求使用不含离子源的无碱玻璃。

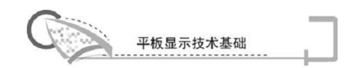
(3) 耐药性高，考虑到薄膜晶体管制作中要接触不同光刻的多种药液，要求耐药性高。

(4) 热收缩率要求严格，玻璃基板的热收缩会使画面内部的栅电容分布不均匀，引起闪烁和烧蚀等显示不良，也会引起TFT基板和CF基板的对位偏移，因此对玻璃基板的热收缩率要求严格。

(5) 表面平坦，为获得高性能的薄膜晶体管，要求玻璃基板低比重性，表面要平坦，表面缺陷及内部缺陷少。

5.5　彩　　膜

液晶显示器是被动发光器件，本身无法发光，也不能实现彩色显示。因此，液晶显示器实现彩色显示的方法主要有两种：一种是场时序彩色显示(Field Sequential Color)，不用彩膜，而是快速地把红、绿、蓝三色背光源的图像信息按照时间顺序分时显示在显示屏上，利用人眼的视觉暂留特性合成彩色图像的方法；另一种是彩色滤光膜(Color Filter)，简称彩膜。在液晶屏的一块玻璃基板上制作出红、绿、蓝三种颜色的薄膜，当白光通过彩膜时，透射出来的光就会呈现出红、绿、蓝3种颜色，通过这3种颜色的混合，形成需要的各种颜色。本节主要介绍用彩膜实现彩色显示的方法。



5.5.1 颜色的本质

颜色的本质是由人眼看到光的波长决定的。国际照明学会在 1931 年用颜色的基本坐标描述光的颜色特征，称为 CIE 1931 色坐标。经常应用的 CIE 色坐标的色度用两个参数 x、y 来表示，如图 5.12 所示。

CIE 色坐标的色纯度呈现马蹄形，越靠近马蹄形中央的颜色色纯度越低，越靠近马蹄形边缘的颜色色纯度越高。在自然界中存在的所有颜色都可以用这个马蹄形状的坐标来表示。R、G、B 三基色的点构成的三角形为彩色显示的色彩范围，三角形越大，意味着能彩色显示的颜色范围越大。为了描述显示器显示颜色的特性，美国国家电视系统委员会(National Television Systems Committee，NTSC)规定 $R=(0.67，0.33)$，$G=(0.21，0.71)$，$B=(0.14，0.08)$构成的三角形为电视的参照标准，NTSC 三角形的面积是 0.1582。显示器实际显示的三基色 RGB 构成的三角形与 NTSC 三角形的比值称为色阶(Color Gamut)。色阶越大，混合出的颜色越丰富，色彩越鲜艳。

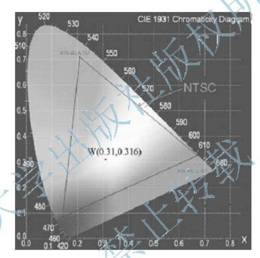


图 5.12 CIE 1931 色度图

5.5.2 混色的方法

混色的方法有两种，一种为加法混色，另一种为减法混色。加法混色是把颜色光叠加起来的混色方法，相当于两个位置矢量的加法。混合色的总亮度等于组成的各种色光亮度的总和，如图 5.13(a)所示。红、绿、蓝为加法混色的三基色，用这 3 种光以适当比例的加法混合可以得到白色，改变其比例可得到许多不同颜色的光。减法混色与上述类似，只是加法变减法，如图 5.13(b)所示。红、黄、青为减法混色的三基色，用这 3 种光以适当的比例减法混色可以得到黑色。

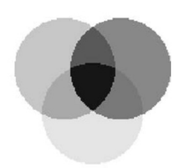
目前使用红、绿、蓝彩膜技术属于加法混色。同一种颜色可以由不同种颜色混合形成为同色异谱现象。如同种颜色的白光，人眼是分辨不出哪一种白光是太阳光，哪一种是红、绿、蓝合成出来的。只有测试出光谱才能区别出来。

由于同色异谱现象，在液晶显示中要使背光源的光谱[图 5.14(a)]与彩膜的光谱[图 5.14(b)]特性匹配，也就是要调配好背光源的发光峰值与彩膜的光谱相匹配提高光的利用率，呈现鲜明的颜色[图 5.14(c)]，获得较大的色阶。





(a) 加法混色



(b) 减法混色

图 5.13　混色的方法

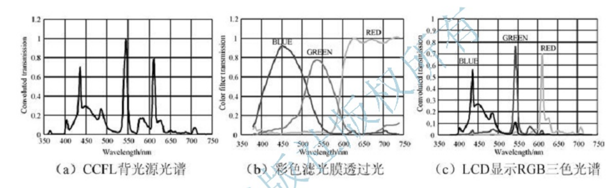


图 5.14　CCFL 背光源光谱、彩色滤光膜透过光、LCD 显示 RGB 三色光谱

5.5.3　LCD 彩色显示的原理

液晶显示器利用红、绿、蓝三色彩膜的加法混色法获得各种色彩。背光源的白光射入液晶层，通过不同程度地控制每个像素上液晶分子的扭曲，照射到彩膜上红、绿、蓝三基色染料的光不同程度地通过，形成不同颜色的光在人眼混合形成彩色图像，如图 5.15 所示。因此，彩膜决定液晶屏的彩色特性是液晶显示器的重要组成部分。

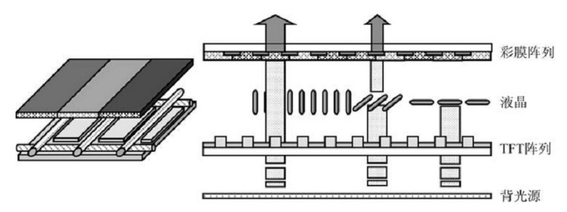
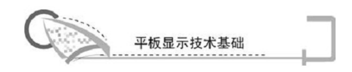
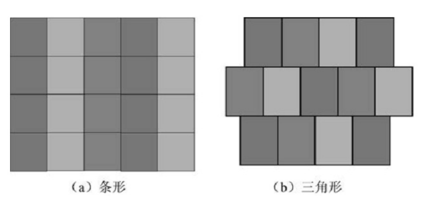


图 5.15　彩色显示的原理

彩膜的红、绿、蓝三色加法混色的配色方式有 3 种：条状方式、三角形方式和马赛克(或称对角)方式，如图 5.16 所示。由于条状方式布线简单，常采用这种形式，三角形方式在显示视频图像时，图像边缘更光滑，但要求驱动 IC 能够支持这种方式。





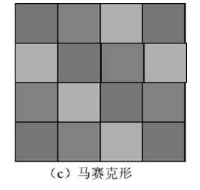


图 5.16　子像素的排列方式

5.5.4　彩膜的基本结构

彩膜在 TFT-LCD 显示面板中的成本比重较大，以 15 英寸面板成本来看，彩膜占 24%左右。因此，彩膜的质量及其技术发展对液晶显示器的质量至关重要。彩膜基本结构如图 5.17 所示，由玻璃基板、彩色层、黑矩阵、保护层及 ITO 共用电极组成。

玻璃基板为彩膜的载体，一般 LCD 面板制造商使用同阵列基板相同型号的玻璃材料，避免在制程中因热膨胀不同而影响良品率。

彩色层采用红、绿、蓝 3 种染料，光刻成阵列基板像素电极大小的图形，放在阵列基板的对面。在光照下透过产生红、绿、蓝三基色光，利用三基色混色原理来实现彩色显示。为了保证光线在液晶显示器的像素电极和彩膜之间不发生偏移，彩膜都放置在液晶屏的内部。彩色层具有滤光的功能，一般需具备耐热性佳、色彩饱和度高与穿透性好等特点。

黑矩阵设置在三基色彩色层的间隙处，通过溅射或涂布方法制备的不透光材料，如 Cr、CrOx 及树脂等，光刻成相应的图形。黑矩阵有两个作用：一是分割各种颜色层提高对比度，防止混色和像素间串色；二是起遮光的作用，遮挡 TFT 防止光照产生光生电流，引起薄膜晶体管关态电流增大的问题。

保护层用来保护彩色层、增加表面的平滑性、作为黑矩阵与透明电极 ITO 层的绝缘层，以及隔离液晶和防止污染。ITO 共用电极是液晶显示器的一个电极，与阵列基板的像素电极构成正负极驱动液晶分子旋转。

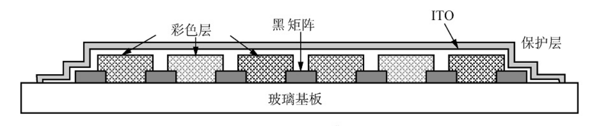


图 5.17　彩色滤光膜的结构

5.5.5　黑矩阵的种类

黑色矩阵(Black Matrix，BM)有单层 Cr BM、Cr/CrO 多层 BM 和树脂 BM，性能见表 5-3。单层 Cr BM 用溅射设备把金属 Cr 膜溅射到玻璃基板上，然后用光刻技术加工成图形。单层 Cr BM 的缺点是表面反射很大。采用 Cr 和 CrO 组成的两层或多层 BM 结构，

利用干涉原理，实现光的相互抵消来降低反射率，解决了反射问题。但采用真空溅射成本高，铬材料对环境存在污染等问题，现在研究开发反射率低的树脂 BM 技术。

表 5-3　几种常见的黑矩阵的光学参数

参数种类	单层 Cr	Cr/CrO 的多层构造	树脂(新型)
光学密度	4.0	4.0	4.0
膜厚	0.17μm	0.23μm	1.2μm
反射率	50%～60%	4%	2%

5.5.6　彩膜制作工艺流程

彩膜的制作方法是染料分散法，把染料分散于黏合剂树脂中形成着色树脂。彩膜图形是用光刻胶光刻法形成的，又称为刻蚀型染料分散法。制备的工艺流程如图 5.18 所示。

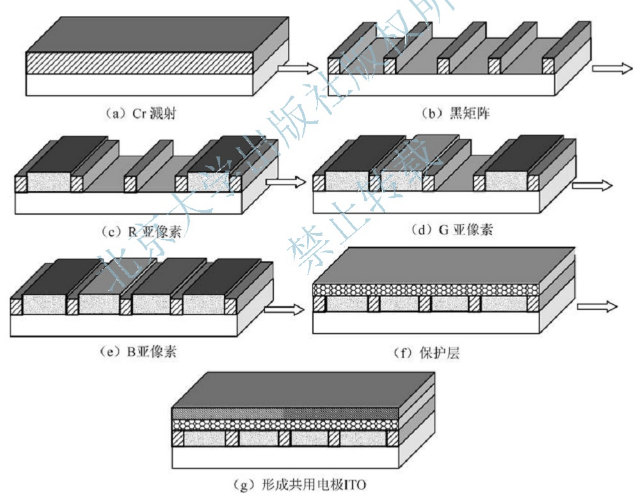


图 5.18　染料分散法制备彩膜的工艺流程

(1) 黑矩阵光刻。先在玻璃基板上溅射一层金属 Cr 等，形成遮光层，如图 5.18(a)所示。再经过涂正性光刻胶、曝光、显影、坚膜、刻蚀和去胶工艺，光刻出黑矩阵的图形，如图 5.18(b)所示。

（2）彩色层(R、G、B)光刻形成 RGB 的三基色层。首先涂布彩色层红色 R 的亚像素，再涂上光刻胶，用掩模版曝光，显影，刻蚀彩膜层，去胶后形成了 R 像素，如图 5.18(c)所示。重复上面的过程，得到第二个颜色绿色 G 的亚像素，如图 5.18(d)所示。第三个颜色为蓝色 B，如图 5.18(e)所示。

（3）形成保护层，保护层由明胶树脂、环氧树脂、聚酰胺树脂和硅胶树脂来形成。用旋涂等方法全面涂布后完全固化来形成保护层，如图 5.18(f)所示。

（4）形成 ITO 共用电极，用溅射设备在保护层上溅射形成 ITO 膜，如图 5.18(g)所示。

（5）检查。

5.6 阵列的单元像素

TFT LCD 阵列基板的薄膜晶体管最常用的是非晶硅薄膜晶体管(hydrogenated amorphous silicon TFT，a-Si∶H TFT)，就是有源层采用非晶硅半导体材料制成的薄膜晶体管。

5.6.1 单元像素的结构

薄膜晶体管在液晶显示器中的结构和单元像素的结构如图 5.19 所示。每一个像素都由栅极、绝缘层、a-Si∶H 有源层、n^+ a-Si 欧姆接触层、源极、漏极、像素电极、扫描线、信号线、引线电极、存储电容组成。

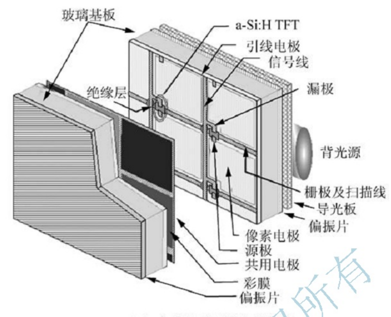
TFT 的栅极是开关电极，绝缘层用于分隔栅极与源、漏电极和信号线。扫描线与 TFT 的栅极相连，控制一行 TFT 器件的开关。TFT 的漏极与信号线相连，源极与像素电极相连。当 TFT 开关导通时，信号线上的信号由漏极，经过 TFT 开关传到源极上，加到像素电极的液晶分子上，控制液晶分子的扭曲。引线电极在阵列基板的边缘，与驱动 IC 等模块组件相连。

5.6.2 单元像素的等效电路

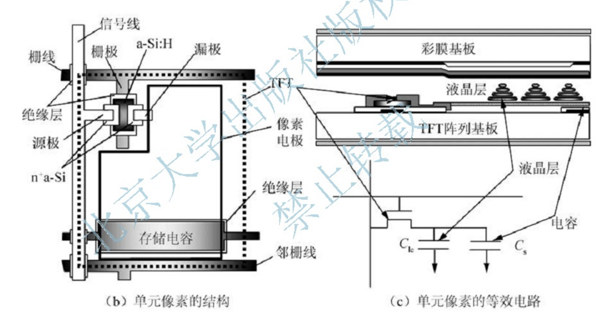
TFT 是一种绝缘栅场效应晶体管，等效为一个晶体管电路。栅极与栅线相连，源极与信号线相连，漏极与像素电极相连。液晶材料属于绝缘体，通常情况下电导率很低。阵列基板上的像素电极和彩膜基板上的共用电极形成了液晶材料两端的电极。因此，液晶屏的像素电极部分等效于一个电容 C_{lc}。同时，像素电极与栅极同时制作出来的存储电容电极之间隔着绝缘膜构成了存储电容 C_s，与液晶电容 C_{lc}并联。因此，有源矩阵液晶显示器的一个单元像素等效为一个晶体管开关，连接两个并联液晶电容 C_{lc}与存储电容 C_s的等效电路如图 5.19(c)所示。

开关的控制与栅线相连，当 TFT 栅极被扫描选通时，栅极上加一正高压脉冲，TFT 导通。源极有信号输入，导通的 TFT 通过开态电流 I_{on}，将图像信号传送到与导通 TFT 相连的液晶像素电容 C_{lc}和存储电容 C_s 上后，两者同时充电，信号电压存储在液晶像素电容和存储电容上。液晶像素的信号电压驱动液晶分子旋转，实现相应的显示，存储电容起到保持图像显示的作用。





(a) 在液晶显示器中的部分



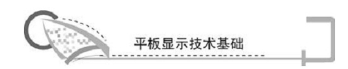
(b) 单元像素的结构　　(c) 单元像素的等效电路

图 5.19　有源矩阵液晶显示器中单元像素的结构

5.7　液晶显示器的驱动原理

电场、磁场和热量都可以改变液晶分子指向矢的排列方向，从而改变液晶屏的光学特性。用外电场作用来改变液晶分子排列的过程称为液晶显示器的驱动。驱动方式分静态驱动和动态驱动两大类。静态驱动(static drive)方式是在每一个像素连接一个电极，直接施加电压驱动像素。电极之间相互独立，不会互相影响，但需要的电极引线数目多；动态驱动(dynamic drive)方式用时间信号分时驱动多个像素，又称为时间分割驱动。电极引线数目减少，但是相互之间会产生影响。动态驱动方式包括无源矩阵驱动和有源矩阵驱动两大类。





由于液晶本身的特点，液晶显示器的驱动有下列特点。

(1) 为了避免液晶分子的电离，防止液晶材料的结构受到破坏，提高液晶显示器的寿命，不能用直流驱动液晶屏，必须采用交流驱动，其中的直流分量只有几十个毫伏。

(2) 液晶屏的等效电阻很大，相当于绝缘体，而且液晶屏厚度只有几个微米。因此液晶屏的每一个像素等效为一个电容 C_{lc}，是无极性的，正压与负压对液晶的作用效果是一样的。

(3) 液晶分子在外电场作用下重新排列改变光学特性。因此，液晶分子的响应时间长，特别是弛豫时间很长，为毫秒量级。当外电场工作频率小于 10^3 Hz 时，交流驱动电压的作用效果不取决于峰值，而是取决于外加电压的有效值。

5.7.1 段码式显示及静态驱动

最早的液晶显示器实现文字和数字的显示采用的是段码式电极，是一种静态驱动方式。如计算器，采用的是七段式电极。每一段分别由两块基板上的 ITO 电极中间注入液晶材料组成一个像素。上电极为所有段的共用电极，下电极分成 7 段，如图 5.20 所示。要实现 n 段显示，就需要有 $n+1$ 个引线电极。

施加到段码电极和共用电极上的交流信号为占空比 50% 的方波，波形如图 5.21 所示。为保证低功率消耗，刷新频率要尽量低，但为了避免闪烁，刷新频率要尽量高。因此，设一定的刷新频率为 $1/T$。

当在段码电极和共用电极施加幅值为 V 的方波信号，且反相时，在液晶像素段上叠加的是幅值为 V 的方波，电压大于饱和电压，液晶显示为 ON 态，如图 5.21(a)所示。当在段码电极和共用电极幅值为 V 的方波信号，且同相时，在液晶像素段上叠加的电压信号为 0，液晶显示为 OFF 态，如图 5.21(b)所示。

以七段式电极的静态驱动法显示一个数字“2”为例，说明驱动的电压信号。用 0 表示段码电极与共用电极同相，用 1 表示反相。要实现数字“2”的显示，需要施加在 7 个段码电极上的电压信号分别为：1011011。0 的时候为 OFF 像素，为白态；1 的时候为 ON 像素，为黑态，由此显示了数字“2”，如图 5.20 所示。

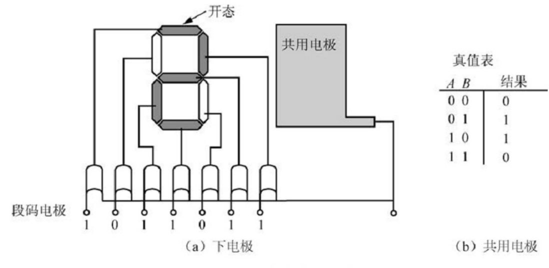


图 5.20 七段式液晶显示器



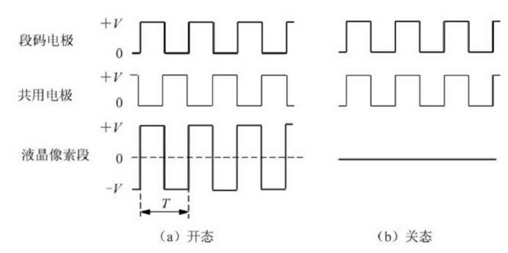


图 5.21 静态驱动的典型波形

5.7.2 无源矩阵液晶显示器的点阵式驱动

无源矩阵液晶显示器是由两张带有 ITO 光刻图形玻璃板贴合并注入液晶材料构成的。一个基板的电极光刻成 N 行，另一基板的电极光刻成 M 列，形成 $N\times M$ 的矩阵点阵。每一个交叉点就是一个像素，共 $N\times M$ 个像素。电极引线数目从段码式寻址的 $N\times M+1$ 条减少到 $N+M$ 条线。在两张玻璃板内表面的透明电极上施加电压，实现两电极交叉部分的像素显示，如图 5.22(a)所示。

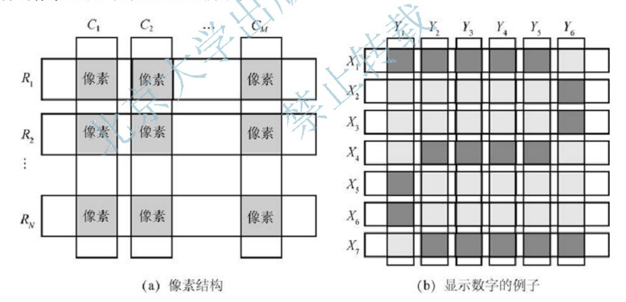


图 5.22 无源矩阵点阵的像素结构和显示数字的例子

1. 驱动原理

1) 行电极逐行选通

行电极又称扫描电极，用 X 表示，从 X_1，X_2，…一直到 X_N，共 N 行。行电极施加扫描电压，依次从第一行扫描到最后一行，每行施加脉冲的高电压持续的时间是 T/N，低电压持续的时间是$(N-1)T/N$，如图 5.23 所示。

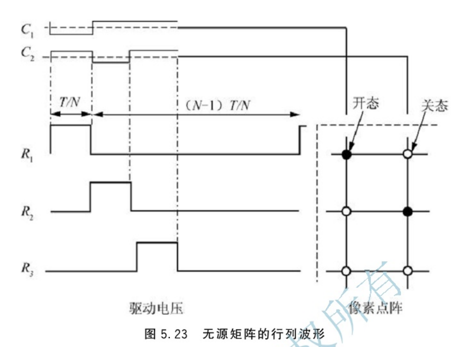


图 5.23 无源矩阵的行列波形

2）列电极同时施加时序信号

列电极又称信号电极，用 Y 表示，从 Y_1，Y_2，…一直到 Y_M，共 M 列。在选通相应扫描电极的同时，在列电极上施加与显示内容相应的时序信号电压。当行电极的扫描信号和列电极的数据信号在某一时刻同相时，行列交叉的像素为关态，显示白色；反相时，像素为开态，显示黑色。

3）完成一帧后，重复上述过程

2. 显示实例

以 7 行、6 列的无源矩阵点阵为例，显示数字“2”为例，如图 5.22(b)所示。用 0 表示段码电极与共用电极同相，用 1 表示反相。

选通 X_1行时，同时要选通 Y_1～Y_5信号电极，6 列上的信号在该时序为“111110”。

选通 X_2行时，同时要选通 Y_6信号电极，6 列上的信号在该时序为“000001”。

选通 X_3行时，同时要选通 Y_6信号电极，6 列上的信号在该时序为“000001”。

选通 X_4行时，同时要选通 Y_2～Y_5信号电极，6 列上的信号在该时序为“011110”。

选通 X_5行时，同时要选通 Y_1信号电极，6 列上的信号在该时序为“100000”。

选通 X_6行时，同时要选通 Y_1信号电极，6 列上的信号在该时序为“100000”。

选通 X_7行时，同时要选通 Y_2～Y_6信号电极，6 列上的信号在该时序为“011111”。

5.7.3 交叉串扰

交叉串扰是由于相邻或接近的电路之间的非正常耦合，导致电路的某一部分的信号特性影响到电路的另一部分，相邻或接近区域亮度与色彩的变化引起的。交叉串扰现象随着显示尺寸的增大、分辨率变得更高、液晶材料的响应变得更快而变得更加明显。

1. 无源矩阵驱动方式

无源矩阵液晶显示器的等效电路图如图 5.24 所示。由行的扫描电极 X 和列的信号电



极 Y 构成，行电极 X 和列 Y 交点构成液晶显示像素。中间的液晶材料属于绝缘体，像素电极部分等效于一个电容 C_{lc}。

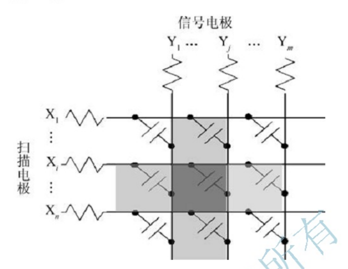
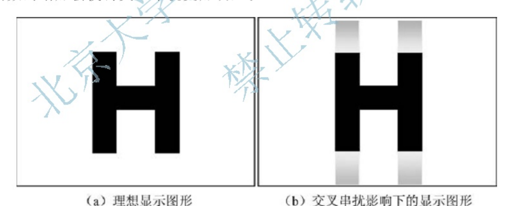


图 5.24 无源矩阵液晶显示器的等效电路

无源矩阵驱动方式导致在相同行或列上的像素会被同一电极线上电压影响。当要显示 X_i 和 Y_j 电极相交点的液晶像素时，(X_i，Y_j)为全选点像素。在(X_i，Y_j)点相邻的点，X_i 行或 Y_j 列上的各像素为半选点像素。不在 X_i 行，又不在 Y_j 列的点为非选点像素。在全选点加上电压后，行列电极同时施加信号，影响半选点也获得一定的分压而被“点亮”，造成全选点和周围半选点间对比度降低，显示质量劣化引起交叉串扰，如图 5.25 所示。行数或者列数的增加会使得交叉串扰更加明显。



(a) 理想显示图形　　(b) 交叉串扰影响下的显示图形

图 5.25 交叉串扰现象

2. 时间延迟

液晶显示像素是一个无极性电容，具有双向导通性的特性。液晶材料的电容 C 性质以及电极线的电阻 R 性质是引起交叉串扰的另一个原因。无源矩阵的扫描线和信号线电极在交叉点同时又是显示像素的上下电极。由此电阻 R 偏大，电容电阻的 RC 时间常数导致脉冲驱动电压上有一个时间延迟，列延迟引起施加的脉冲波形在列传输过程中的劣化，显示效果出现纵向交叉串扰，如图 5.26 所示。

行列电压特性施加到相同列的连续 5 个像素上。理想状态下，第一个和最后两个为关态(白态)，第二个和第三个像素为开态(黑态)。由于时间延迟，列传输的第一个结果是开



态像素亮度的减小，关态像素亮度的增加。如第 2 行的像素比理想情况从驱动电压上获得了更少的电压，为不完全开态显示半黑态。第 4 行的像素比理想情况从驱动电压上获得了更高的电压，处于不完全关态显示半黑态。由于列信号传输存在时间延迟的情况下对比度下降，引起交叉串扰。

综上所述，交叉串扰现象的根本原因在于无源矩阵的驱动方式及液晶材料本身的无极性阻抗。交叉串扰现象随着矩阵行、列数目的增大而加剧。一般而言，TN-LCD 显示最大容量不超过 200 行，而 STN-LCD 显示的最大容量不超过 300 行，主要用于移动电话、掌上计算机、文字处理器等产品的显示终端。

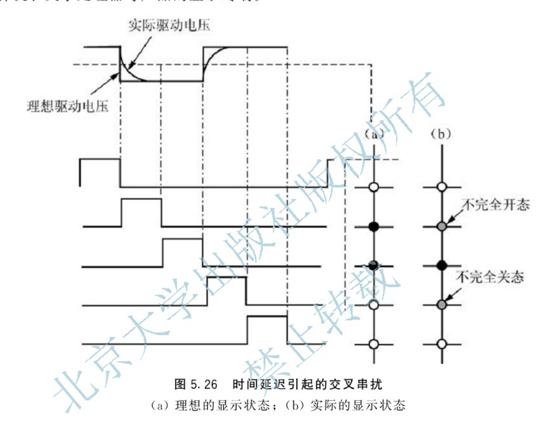


图 5.26　时间延迟引起的交叉串扰

(a) 理想的显示状态；(b) 实际的显示状态

5.7.4　有源矩阵液晶显示器的驱动

1. 有源矩阵驱动特点

有源矩阵上基板的电极和段码显示一样只有一个共用电极。下基板的电极上有行和列电极，分别为扫描电极和信号电极，行和列的交叉点处连接一个开关器件，每一个开关器件控制一个像素电极。开关器件控制着像素选通和非选通，有效地避免了交叉串扰。

采用 TFT 作开关器件的液晶显示器扫描行数从理论上可以达到无穷，可实现大容量信息显示。因此，TFT AMLCD 使液晶显示器进入了高分辨、高像质、真彩色显示的新阶段，所有高档液晶显示中都毫无例外地采用了 TFT 有源矩阵。

2. 逐行扫描的驱动原理

1）行电极逐行选通

有源矩阵液晶显示器的扫描电极从第一行开始依次扫描，在任意时刻，有且只有一行

的所有 TFT 被扫描选通而开启，其他行的 TFT 都处于关断状态。

2）列电极同时施加时序信号

信号线施加显示图像的信号电压，通过开启的 TFT 传到像素电极上，只会影响到该行的显示内容。对这一列上未选通行上的 TFT 处于断开状态，信号电压加不到像素电极上，对相邻像素没有影响。

3）信号电压对液晶像素电容和存储电容充电

扫描行的 TFT 导通，信号电压对像素电容和存储电容充电，存储在两个电容上。在液晶电容 C_{lc}上的电位差驱动液晶分子扭曲实现显示。

由单元像素等效电路组成了 AMLCD 的等效电路，如图 5.27 所示。当扫描线 X_i 上加高电压时，连接在 X_i 上的 TFT 全部打开。与此同时在信号线（$Y_1 \sim Y_m$）上把所有要显示图像的时序信号送到各个信号电极上，加到 TFT 的源极上。信号电压同时给液晶电容 C_{lc} 和存储电容 C_s 充电。图像信号便通过该行上开启的 TFT 将信号电荷加在液晶像素上实现液晶显示。

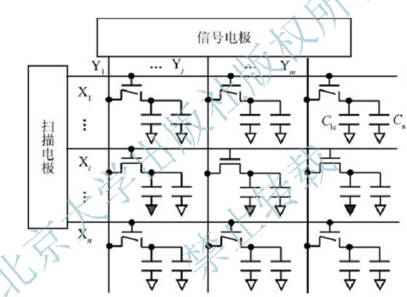


图 5.27　AMLCD 的等效电路

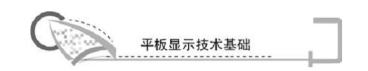
4）存储电容放电维持画面显示

当扫描下一行时扫描线 X_i 行扫描结束，变成为 0 或低电压，该行上所有 TFT 关闭。存储电容 C_s 放电，给液晶像素电容 C_{lc} 充电。维持液晶像素图像显示将保持一帧的时间，直至下一帧再次被选通后新的电压到来，C_{lc}和 C_s上的电荷才改变。

5）完成一帧后，重复上述过程

从第一行扫描线依次扫描到最后一行所用的时间为一帧，扫描完一帧后，再重复前面步骤，便可显示出需要的图像。

因此，有源矩阵液晶显示器的驱动中扫描电压可以称为寻址的开关电压，信号电压又称为显示的驱动电压，可以实现寻址的开关电压和显示的驱动电压之间的分离，消除交叉串扰，达到电开关器件的开关特性和光开关器件的液晶像素电光特性最佳组合，获得高质量显示。



5.7.5 有源矩阵液晶显示器的驱动电压波形

有源矩阵液晶显示器的驱动方式除逐行扫描外，还有帧反转、行反转、列反转和点反转等。帧反转方式是把一帧的图像分为奇数帧和偶数帧两场栅信号电压进行扫描，又称为隔行扫描方式。由于一场的时间相对较长，帧反转容易产生图像闪烁和亮度不均的现象。行反转和列反转方式是信号电压的极性每隔一行或一列进行反转一次的驱动方式。不仅使图像闪烁现象得到很大改善，而且避免了长时间施加直流电压对液晶材料的不良影响。点反转方式是施加在每一个像素点上的信号电压的极性都进行反转的驱动方式，优于行和列反转的驱动方式，具有更好的显示效果。另外，上述驱动方式与共用电极反转结合还可以实现驱动电路的低电压化。

以帧反转且共用电极直流驱动方式为例，分析 TFT-LCD 的驱动电压波形，如图 5.28 所示。细实线为施加的扫描电压的驱动波形。外面为理想的矩形栅脉冲，内部为实际施加的矩形栅脉冲，存在上升沿和下降沿。栅脉冲的高压段为写入特性区，脉冲长度为写入时间长度；栅脉冲的低压段为保持特性区，脉冲长度为保持时间长度。细点状线为施加的数据信号电压波形。粗实线为液晶像素电压的波形。V_g 为扫描电压，即栅极电压；$V_{sig.c}$ 为信号电压，每一帧进行反转的交流驱动；V_{com} 为共用电极的电压，为直流电压；V_p 为施加到液晶像素上的电压；ΔV_P 为液晶像素上的跳变电压；V_{offs} 为补偿电压。

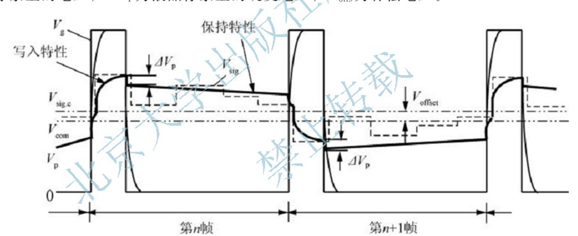


图 5.28 a－Si∶H TFT AMLCD 驱动电压波形

液晶像素上的电压波形由写入特性、馈入特性和保持特性组成。为了防止长时间施加直流电压造成液晶材料的劣化，加在液晶像素上的电压经过一帧时间反转，实现对液晶像素的交流驱动。

1. 写入特性

写入特性是在行周期内完成信号电压对液晶像素的充电过程。帧反转方式的写入时间比逐点扫描长得多，所以对 TFT 的响应时间要求不高。a-Si∶H TFT-LCD 写入特性与 TFT 的开态电流、液晶像素的存储电容量、充电时间以及信号电压有关。

提高 TFT 开态电流、适当设计液晶像素电容、增大信号电压等是获得较好写入特性的关键。优化 a-Si∶H 和 SiN_x 材料的制备工艺，提高 a-Si∶H 材料的载流子迁移率，并改善 a-Si∶H/SiN_x 的界面特性可显著提高 TFT 的开态电流。在液晶材料确定后，优化设计



存储电容的大小可获得合理的液晶像素的存储电容量。减小信号电压的写入时间，提高写入速度。

2. 保持特性

在保持时间内，液晶像素上的电压在一帧时间内基本保持不变，否则将出现图像显示混乱和闪烁现象。保持特性与 TFT 的关态电流、液晶像素的存储电容量和液晶材料本身的漏电流有关。

TFT 关态电流的大小是影响保持特性的重要因素。液晶像素存储电容量的大小应结合写入特性综合考虑。选择高阻、高纯度的液晶材料可减小液晶材料本身的漏电流。总之，TFT 的关态电流和液晶材料本身的漏电流越小，存储在液晶像素上的电荷越不容易释放掉，液晶像素上的信号电压才可以长时间保持且基本不变，直到下一帧图像信号到来。

3. 馈入特性

馈入特性是指栅脉冲由开态向关态转变过程中，加在液晶像素上的电压会产生一跳变，表示为 ΔVp。跳变电压产生的原因是栅极电压脉冲 V_g 通过栅源交叠电容耦合到液晶像素上的电压，表达式为：

$$\Delta V_P = \frac{C_{gs}}{C_{gs}+C_{lc}+C_s} \cdot V_{gp-p}$$

式中 V_{gp-p}是施加的栅极电压脉冲 V_g 的幅值。由于 ΔV_p的存在，连续两帧加在液晶像素电极上的正负脉冲的电压中心 V_{com}，与信号电压 V_{sig}的电压中心 $V_{sig.c}$产生一电压偏移为补偿电压 V_{off}，其表达式为：

$$V_{off} = V_{sig.c} - V_{com} = \Delta V_p$$

当馈入电压 ΔV_p是常数时，V_{com}很容易确定。但由于液晶像素电容 C_{lc}与液晶材料的介电常数 ε 成正比，介电常数随液晶分子取向的变化而表现出各向异性。当信号电压在对液晶像素充电的过程中，液晶像素电容 C_{lc}将随着液晶分子取向的变化而变化，造成馈入电压 ΔV_p的差异。导致的结果有：①在液晶像素上产生可变的直流分量 V_{dc}，造成液晶材料的劣化及显示图像的闪烁；②引起加在液晶像素上的均方根电压的变化，从而影响显示图像的灰度级；③ΔV_p的差异很难通过调整 V_{com}来补偿。因此，馈入电压 ΔV_p的减小是十分必要的。

本章小结

有源矩阵液晶显示器有薄膜晶体管的电开关和液晶像素的光开关，可以很好地避免交叉串绕，实现高清晰度、高分辨率、全彩色显示，是目前液晶显示器市场中高档次的产品、当今时代的主流。本章重点讲述了有源矩阵液晶显示器的结构，介绍几种主要的组成部件，并从驱动原理上介绍有矩阵液晶显示器的优点及成为当今时代主流的原因。

1. 有源矩阵液晶显示器的结构

有源矩阵液晶显示器(Active Matrix liquid crystal display，AMLCD)是在每一个像素上都配置有源器件，可以独立控制开关的高质量图像显示的液晶显示器，由阵列基板、彩膜基板、液晶屏部分、驱动 IC 和周边组件部分，以及背光源组成。

2. CCFL 背光源

冷阴极荧光灯(Cold Cathode Fluorescent Lamps，CCFL)是一种气体放电发光器件，其构造类似常用的日光灯，具有灯管细小、结构简单、表面温升小、表面亮度高、显色性好、发光均匀、价格低、易加工成各种形状等优点，广泛应用于大多数液晶显示器中。

3. LED 背光源

LED 是 Light Emitting Diode(发光二极管)的缩写，是一种由 p 型和 n 型半导体组成的半导体器件。作为背光源技术在显示器产品上的应用是一种新的技术，具有更轻薄、光衰期、长效率高、耗电少、色域广、环保的优点，LED 全面取代 CCFL 背光源的时代很快就会到来。常见的 LED 电视是一种采用了 LED 背光源的液晶电视。实质上还是液晶显示器的一种，与传统的 CCFL 背光源的液晶电视相比仅仅是背光源种类的不同。

4. 玻璃基板

玻璃基板是目前液晶显示器使用的主要材料，在液晶显示器领域占有相当重要的地位。玻璃的种类有：碱玻璃、低碱玻璃、无碱玻璃。有源矩阵液晶显示器使用的是无碱玻璃。

5. 彩膜

液晶显示器是被动发光器件本身无法发光，也不能实现彩色显示，彩膜技术是当前实现彩色显示的主要方法。彩膜由玻璃基板、彩色层、黑矩阵、保护层及 ITO 共用电极组成。利用红、绿、蓝三色彩膜层的加法混色法获得到需要的各种色彩。

6. 阵列的单元像素

TFT LCD 阵列基板的薄膜晶体管最常用的是非晶硅薄膜晶体管，每一个像素都由栅极、绝缘层、a-Si:H 有源层、n^+ a-Si 欧姆接触层、源极、漏极、像素电极、扫描线、信号线、引线电极、存储电容组成。有源矩阵液晶显示器的一个单元像素等效为一个晶体管开关，连接两个并联液晶电容 C_{lc} 与存储电容 C_s 的等效电路。

7. 液晶显示器的驱动原理

段码式显示的静态驱动方式需要的电极引线数目多。而无源矩阵点阵式驱动的动态驱动方式无法避免地存在交叉串扰的现象，随着矩阵行、列数目的增大交叉串扰现象而加剧。一般而言，TN-LCD 显示最大容量不超过 200 行，而 STN-LCD 显示的最大容量不超过 300 行。有源矩阵的点阵式驱动很好地解决了交叉串扰现象，使液晶显示器进入到高分辨、高像质、真彩色显示的新阶段，成为当代显示的主流。

本章习题

一、填空题

1. 薄膜晶体管有源矩阵液晶显示器在每个像素上都有____________作为开关器件，独立控制一个小的 ____________。

2. 液晶显示器的背光源按光源类型主要有____________、____________及电致发光片(EL)3 种背光源类型。

3. 根据 CCFL 光源分布位置不同，分为__________和__________。

4. 玻璃的种类有：__________、__________、__________。

5. 液晶显示器实现彩色显示的方法主要有两种：__________和__________。

6. 目前液晶显示器使用红、绿、蓝彩膜技术属于__________混色。

7. 段码式显示的驱动，要实现 n 段显示，就需要有__________个引线电极。

8. 交叉串扰现象随着矩阵行、列数目的增大而__________。

9. 有源矩阵液晶显示器上基板的电极是一个__________。下基板的电极上有行和列电极，分别为__________和__________，行和列的交叉点处连接一个__________，每一个__________控制一个像素电极。

10. 有源矩阵液晶显示器中，有__________开关和__________开关。图像信号通过薄膜晶体管传送到与其相连的__________电容和__________电容上实现显示和存储。

二、判断题

1. CCFL 属于平面光源，可实现背光源均匀的亮度输出。（　　）

2. 市场上可以买到的 LED 电视是一种采用了 LED 自发发光显示的电视。（　　）

3. 直下式 LED 背光技术可以采用区域调光技术。（　　）

4. 无源矩阵液晶显示器制造工艺的温度要求低，使用的是无碱玻璃。（　　）

5. 段码式驱动的显示器中，上电极和下电极都有光刻出需要的段数。（　　）

6. 采用 TFT 作开关器件的液晶显示器扫描行数从理论上可以达到无穷，可实现大容量信息显示。（　　）

7. TFT 的栅极是开关电极，用绝缘膜与源、漏电极和信号线分开。（　　）

8. 在当今的液晶显示器市场上大多数都是采用了非晶硅薄膜晶体管的有源矩阵液晶显示器。（　　）

三、名词解释

有源矩阵液晶显示器、区域调光技术、静态驱动方式、动态驱动方式、交叉串扰

四、简答题

1. 简述有源矩阵液晶显示器的主要组成部件。

2. 简述 LED 背光源的优势。

3. 简述 LED 背光源技术的发展趋势。

4. 简述彩色显示的原理。

5. 简述彩膜的基本结构及各部分的作用。

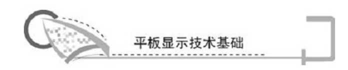
6. 简述彩膜的工艺流程。

7. 简述液晶显示器的驱动的特点。

8. 描述无源矩阵的点阵式驱动的原理。

9. 分析交叉串扰产生的原因。

10. 简述有源矩阵的驱动原理。



五、计算题与分析题

1. 分析常见的LED电视、LED显示和真LED电视的区别，哪一种显示是大多数厂商极力推出的产品？

2. 分析LED背光源采用的是白光LED还是RGB三基色LED，哪种更有优势？

3. 画出阵列基板单元像素的平面图形及等效电路，简述其结构。

4. 分析要用七段式显示一个数字“2”需要加的波形信号，并说明段码式驱动的缺点。

5. 采用动态驱动法，分析显示一个数字“2”，行和列的驱动波形。



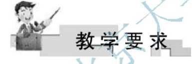
第6章

薄膜晶体管的工作原理

薄膜晶体管液晶显示器是使用薄膜晶体管作开关器件驱动每个像素上的液晶分子进行显示的技术。目前已经进行大规模的生产，形成了产值超过3000亿美元的产业，并且每年以百亿美元的速度递增，已经成为液晶显示的主流产品。薄膜晶体管(Thin Film Transistor，TFT)已经成为电子显示行业的核心器件。那么，什么是薄膜晶体管呢？薄膜晶体管是怎样工作的呢？关键性能及性能参数都有什么？



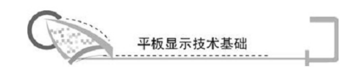
- 了解薄膜晶体管的半导体基础知识；
- 了解MOSFET场效应晶体管的原理；
- 掌握薄膜晶体管的工作原理；
- 了解薄膜晶体管的直流特性及参数。



知识要点	能力要求	相关知识
MOSFET的工作原理	(1) 掌握晶体管的种类和结构特点 (2) 了解MOSFET的工作原理	半导体的性质
薄膜晶体管的工作原理	(1) 了解非晶硅半导体的特点 (2) 掌握薄膜晶体管的工作原理 (3) 了解TFT与MOSFET的区别	半导体器件的结构及特点
薄膜晶体管的直流特性	(1) 了解沟道夹断的原理 (2) 掌握线性区和饱和区的漏极电流	
薄膜晶体管的主要参数	(1) 了解主要参数的种类及影响因素 (2) 掌握主要参数的提取方法	

推荐阅读资料

[1] 刘恩科，朱秉升，罗晋生．半导体物理学[M]．北京：国防工业出版社，1997.
[2] 曹培栋．微电子技术基础[M]．北京：电子工业出版社，2001.





基本概念

薄膜晶体管：Thin Film Transistor，缩写为 TFT，是一种以半导体薄膜制成的绝缘栅场效应晶体管。



发现故事：有源矩阵液晶显示器

1930 年 Lilienfeld 首先提出了场效应晶体管的原理。1960 年 Kahng 和 Atalla 制作出第一个硅基的金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)，是一个历史性的突破。1962 年 Weimer 采用硒化镉 CdSe 材料研制了世界上第一个薄膜晶体管。1973 年 Brody 等采用 CdSe TFT 和向列相液晶制作了历史上第一个有源矩阵液晶显示器。1979 年 Lecomber 等用 a-Si∶H 作有源层，制作了非晶硅薄膜晶体管。

6.1 薄膜晶体管的半导体基础

薄膜晶体管是一种以半导体为核心的场效应晶体管。因此，薄膜晶体管涉及半导体的能带、载流子、输运现象及器件知识，为了能够更好地掌握薄膜晶体管的性质，本节先介绍一些与薄膜晶体管有关的半导体基础知识。

6.1.1 半导体的种类

半导体材料是一类导电特性介于金属和绝缘体之间的固体材料，可分为本征半导体和杂质半导体。本征半导体是完全纯净的、没有缺陷的半导体。杂质半导体是在半导体中掺入一定杂质后的半导体。半导体材料在获得一定能量(如光照、热等)后，少量价电子可挣脱共价键的束缚，称为自由电子，同时在共价键中就留下一个空位称为空穴。自由电子和空穴总是成对出现的，同时又不断复合。半导体材料中用得最多的是硅或锗，都是 4 价元素，以硅为例说明自由电子和空穴，如图 6.1 所示。

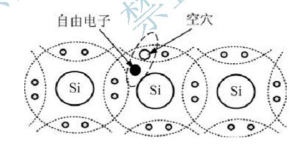


图 6.1 半导体中的自由电子和空穴

在外电场的作用下，自由电子逆着电场方向定向运动形成电子电流。带正电的空穴吸引相邻原子中的价电子来填补，而在该原子的共价键中产生另一个空穴。空穴被填补和相继产生的现象，可以看成空穴顺着电场方向移动形成空穴电流。在半导体中运载电荷而引起电流的导带电子与价带空穴统称为载流子，在半导体中，自由电子和空穴两种载流子都能参与导电。

本征半导体中由于载流子数量极少，导电能力很低，如果掺入微量的杂质(某种元素)形成杂质半导体，导电能力将大大增强。在硅或锗的晶体中掺入 5 价元素磷，当某一个硅原子被磷原子取代时，磷原子的 5 个价电子中只有 4 个用于组成共价键，多余的一个电子



很容易挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子。自由电子的数量大大增加，形成了半导体材料的多数载流子，而空穴是少数载流子，这种半导体称为n型半导体。在硅或锗的晶体中掺入3价元素硼，在组成共价键时，将因缺少一个电子而产生一个空位，相邻硅原子的价电子很容易填补这个空位，在该原子中便产生一个空穴，使空穴的数量大大增加，成为多数载流子，电子是少数载流子，这种半导体称为p型半导体，如图6.2所示。

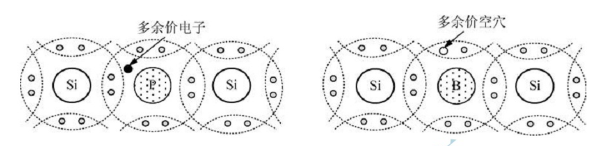


图6.2　n型半导体和p型半导体

6.1.2　费米能级

半导体中大量电子的集体可以看成是一个热力学系统。费米能级表示系统处于热平衡状态也不对外界做功的情况下，系统中增加一个电子所引起系统自由能的变化，也就是等于系统的费米能级。热平衡状态的系统有统一的费米能级，体系中的自由载流子浓度——电子和空穴保持动态的平衡。用费米能级E_F表示。

费米能级的物理意义：①费米能级标志了电子填充能级的水平，费米能级位置较高，意味着有较多的能量较高的量子态上有电子；②费米能级以上的量子态被电子占据的几率很少，费米能级以下的量子态几乎都被电子填满；③费米能级的位置由半导体材料的掺杂浓度和温度决定，反映了载流子在半导体内能带上的分布情况。

不同种类的半导体材料，费米能级的位置不同。在未掺杂质的本征半导体中，费米能级居于禁带中央(E_i)(见图6.3)。n型半导体费米能级在禁带中心线之上，掺杂越多，费米能级的位置越高，越接近导带(E_c)，甚至可以进入导带之内，变成简并的重掺杂n型半导体。p型半导体费米能级在禁带中心线之下，掺杂越多，费米能级的位置越低，越接近价带(E_v)，甚至可以进入价带之内，变成简并的重掺杂p型半导体。

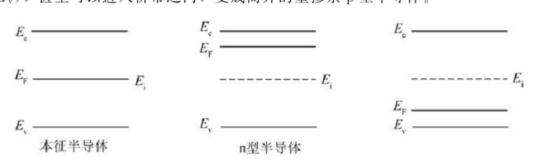


图6.3　半导体材料的费米能级



小提示：非晶硅半导体材料

非晶硅半导体材料是一种没有掺杂的半导体材料，但是由于制作的原因，必然存在一些缺陷。因此，

也不是完全纯净的、没有缺陷的本征半导体，属于弱 n 型半导体材料。费米能级接近禁带中心线，偏向禁带中心线。

6.1.3 电导现象

载流子运动过程中不断与振动的原子、杂质和缺陷等碰撞，运动的速度发生无规则的改变称为散射。正因为散射的存在，电子与电子之间、电子与原子之间不断地交换能量，构成一个热平衡的统计体系。在半导体样品两端加电压，内部产生电场。载流子在电场下加速漂移运动将引起一定电流的现象称为电导现象。

载流子在电场中的漂移速度：

$$v_d = \frac{(\pm q)\tau_p}{m^*}E = \mu E \tag{6.1}$$

式中，τ_p是载流子的寿命；q 是电量；m^* 是载流子的有效质量；E 外加到半导体的电场。

载流子在电场下的漂移方向与外电场 E 平行，漂移速度 v_d与外电场大小成正比。比例系数定义为载流子的迁移率，单位是 cm^2/Vs。迁移率直接决定载流子漂移运动的快慢，反映了半导体材料导电能力的强弱，而且决定材料是否适合做高频器件。由式(6.1)可知，空穴和电子的迁移率为：

$$\mu_p = \frac{q\tau_p}{m_p}(\text{空穴}) \qquad \mu_n = \frac{q\tau_n}{m_n}(\text{电子}) \tag{6.2}$$

一般情况下，电子的有效质量 m_n 小于空穴的有效质量 m_p，因此电子的迁移率比空穴的大。电导率反映半导体材料导电能力的物理量，由载流子密度和迁移率来决定，空穴和电子的电导率可以表示为：

$$\sigma_p = q \cdot p \cdot \mu_p(\text{空穴}) \qquad \sigma_n = q \cdot n \cdot \mu_n(\text{电子}) \tag{6.3}$$



小提示：薄膜晶体管的半导体现象

薄膜晶体管中主要的半导体现象是电导现象，在电场的作用下载流子会定向地运动，导电能力由载流子密度和迁移率来决定。非晶硅半导体材料没有进行掺杂，载流子密度很低。因此，决定薄膜晶体管性质的主要参数是迁移率，如何制作高迁移率的半导体材料是薄膜晶体管研究的主要课题。

6.2 MOS 场效应晶体管

6.2.1 晶体管种类

晶体管是三端半导体器件，按工作原理可以分为两大类：一类是双极型晶体管；另一类是场效应晶体管。

1. 双极型晶体管

双极型晶体管是由两个 pn 结组成的，一个薄层 p 型半导体夹在两层 n 型半导体中间，或者一个薄层 n 型半导体夹在两层 p 型半导体中间称为 npn 晶体管和 pnp 晶体管，



如图 6.4 所示。注入的非平衡少数载流子由另一个 pn 结收集，参加导电的不仅有少数载流子也有多数载流子，称为双极型晶体管。

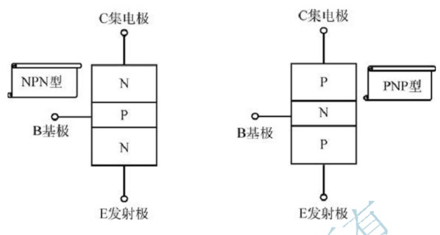


图 6.4　双极性晶体管的结构简图

2. 场效应晶体管

场效应晶体管(Field-Effect Transistors，FET)是利用垂直于导电沟道的电场强度来控制沟道导电能力的一种半导体器件。场效应晶体管的沟道内只有一种载流子运动形成电流，称为单极型晶体管。

按结构和工艺特点分，场效应晶体管又分为三类。第一类是表面场效应晶体管，通常采取绝缘栅的形式称为绝缘栅场效应晶体管(Insutated Gate Field-Effect Transistors，IG-FET)。金属-氧化物-半导体场效应晶体管(Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistors，MOSFET)是一种最重要的绝缘栅场效应晶体管。

第二类是结型场效应晶体管(Junction Field-Effect Transistors，JFET)是用 pn 结势垒电场来控制导电能力的一种体内场效应晶体管。

第三类是薄膜晶体管(Thin Film Transistors，TFT)是利用半导体的薄膜材料制成的绝缘栅场效应晶体管。结构与原理和 MOS 场效应晶体管相似，差别是所用的材料及工艺不同，TFT 采用真空蒸发、化学气相沉积、溅射等工艺先后将半导体、绝缘体和金属沉积在绝缘衬底上。

3. MOSFET 的结构

金属-氧化物-半导体场效应晶体管是超大规模集成电路的基础。大多数的存储器和微处理器使用的是 n 沟道和 p 沟道的 MOSFET 对称组合的 CMOS 器件。

MOSFET 是一种 4 端子的单极晶体管，只靠一种极性的载流子(电子或空穴)传输电流。MOSFET 的 4 个端子是栅极、衬底极、源极和漏极，分别用 G、B、S 和 D 表示。n 型 Si 为衬底的 p 沟道 MOSFET 的结构，如图 6.5 所示。衬底是 n 型 Si 半导体材料，上面是金属栅极，在衬底与栅极之间是一层半导体表面热生长的高质量二氧化硅 SiO_2 层为栅氧化层。栅极对应的氧化层下面的半导体表面称为沟道区。两个 p^+ 区引出的金属电极为源极和漏极。源区与衬底间的 pn 结称为源 pn 结，漏区与衬底间的 pn 结称为漏 pn 结。在半导体表面，源区、漏区和沟道区一起组成有源区。

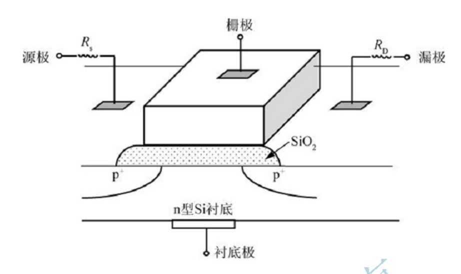


图 6.5　n 型衬底的 p 沟道 MOSFET 的结构图

6.2.2　MIS 结构

1. MIS 结构定义

MOSFET 的工作是以半导体的表面电场效应为基础的。从图 6.5 可以看出，MOSFET 在源区和漏区之间的中心部分是一个金属(栅)-氧化物(SiO_2)-半导体(Si)的结构，是一种金属-绝缘层-半导体的结构(Metal-Instulator-Semiconductor，MIS)。MIS 结构是在半导体衬底上制作绝缘材料，再制作金属电极形成的，由中间以绝缘层隔开的金属和半导体组成，如图 6.6 所示。

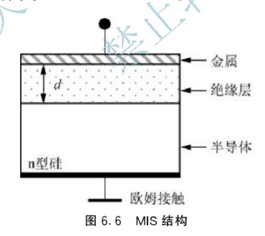


图 6.6　MIS 结构

2. MIS 结构表面电荷的变化

MIS 结构是场效应晶体管的基本组成部分，分析在外加电场作用下 MIS 结构是理解 MOSFET 和 TFT 工作原理的基础。

MIS 结构实际上是一个电容，当在金属与半导体之间加电压后，在金属和半导体相对的两个面上被充电，带上等量异号的电荷。两者载流子密度不同，电荷分布情况亦不相同。在金属中自由电子密度很高，电荷基本上分布在一个原子层的厚度范围之内；在半导体中，自由载流子密度要低得多，电荷必定分布在一定厚度的表面层内，这个带电的表面



层称为空间电荷区。在空间电荷区内的电场逐渐减弱，到空间电荷区的另一端电场减小到零。空间电荷区内电荷的分布情况随金属与半导体间所加的电压 V_g 而变化，基本上可分为积累、耗尽、反型 3 种情况。

以 n 型半导体为例，说明随外加电压变化半导体表面电荷的变化，如图 6.7 所示。随栅压的不同，表面空间电荷的载流子不同。当在栅极上加正压时，$V_g>0$，在 n 型半导体表面感应出等量异号的负电荷，电子被吸引到半导体表面，形成多数载流子电子积累的状态，如图 6.7(a)所示。这一过程在半导体体内引起的变化并不很显著，只是使多数载流子浓度在表面附近较体内有所增加。当在栅极上加负电压，$V_g<0$，将在 n 型半导体表面附近感应出正电荷，电场的作用使得多数载流子电子被排斥而远离表面，在半导体表面只剩下带正电的电离施主时，形成表面空间电荷区，称为耗尽层，如图 6.7(b)所示。如果进一步向负方向增加栅压，$V_g\ll 0$，由于外加电场的作用，半导体中多数载流子被排斥到远离表面，而少数载流子空穴被吸引到表面。少数载流子在表面附近聚集至足够数量后，将成为表面附近区域的多数载流子，称为反型载流子。反型载流子在表面构成一个反型的导电层，如图 6.7(c)所示。

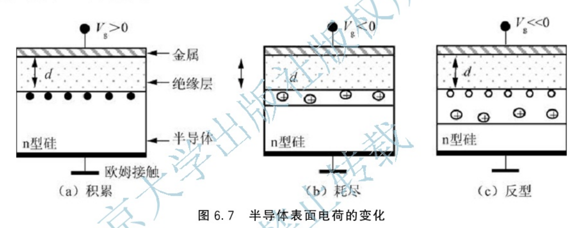


图 6.7　半导体表面电荷的变化



小提示：MOSFET 工作区间

MOSFET 工作在反型区。n 型衬底的 MOSFET 在栅极上加负电压下反型，形成空穴积累的 p 型导电沟道，称为 n 型衬底的 p 沟道 MOSFET。正好相反，p 型衬底的 MOSFET 在栅极上加正电压反型，形成电子积累的 n 型导电沟道，称为 p 型衬底的 n 沟道 MOSFET。

3. MIS 结构能带的变化

在理想的情况下，不加电压下器件内能带处于平直的状态，如图 6.8(a)所示。在外加电场的作用下，空间电荷区内的电势也随距离逐渐变化，半导体表面相对体内产生电势差，称为表面势，以 V_s 表示。同时能带也发生弯曲，不同的栅极电压能带弯曲也不同。以 n 型半导体为例来说明。

1) 电子的积累状态

当栅极加正压，$V_g>0$ 时，表面势 V_s 为正值，表面势高于体内电势，表面处能带向下弯曲，如图 6.8(b)所示。在热平衡情况下，半导体内费米能级保持定值，随着向表面接近，导带底将逐渐移近费米能级，同时导带中的电子浓度也随之增加，表面层内就出现电子的积累而带负电荷。

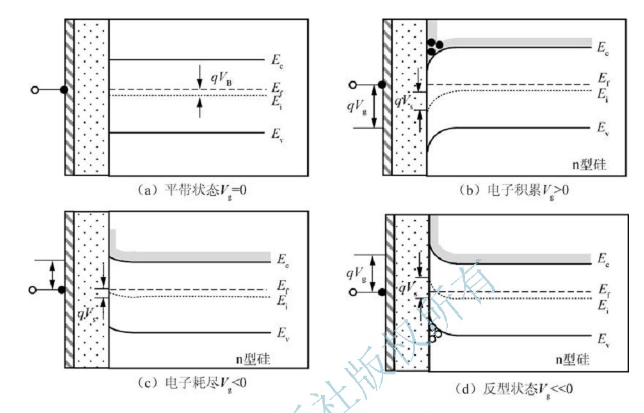


图 6.8 理想的 n 型半导体的 MIS 结构能带图

2) 电子的耗尽状态

当栅极加负压，$V_g<0$ 时，表面势为负值，$V_s<0$，表面处能带向上弯曲，如图 6.8(c) 所示。耗尽状态的临界是禁带中心线是否高于费米能级，$|V_s|<|V_B|$。表面处电子浓度将较体内电子浓度低。

3) 反型状态

当栅极往负方向进一步加大时，$V_g \ll 0$，$V_s<0$，能带进一步向上弯曲，表面处禁带中心线高于费米能级，如图 6.8(d)所示，$|V_s|>|V_B|$。意味着表面空穴浓度将超过体内电子的浓度，形成与原来半导体导电类型相反的反型层。

6.2.3 MOSFET 的工作原理

1. MOSFET 的两个电场

MOSFET 的中心是由栅极、绝缘膜、半导体构成的一个 MIS 结构。两边由源漏电极与半导体材料形成了 pn 结。在栅极与半导体衬底之间加电压，在 Si/SiO_2 界面垂直方向上将形成垂直的电场。在源漏电极之间加电压，在 $p^+/n/p^+$ 水平方向上将形成水平的电场。

2. MOSFET 的关态

n 型衬底 MOS 结构中，当栅极加正压，$V_g \geqslant 0$ 时，电场吸引电子或者说排斥空穴，沟道内积累电子，与源极和漏极高掺杂的 p^+ 区形成 $p^+/n/p^+$ 的形式，也就是说源极和漏极形成了两个 pn 结。在源接地，漏接负，$V_{ds} \leqslant 0$，漏 pn 结为零偏或反偏，这时没有电流在沟道内流动，只有近似于反偏 pn 结的极小的泄漏电流在源到漏之间流动，MOSFET 处于关态，又称截止态，如图 6.9(a)所示。同样，当漏接地，源接负时，$V_{sd} \leqslant 0$，源 pn 结

为零偏或反偏，MOSFET 处于关态。

当在栅极上不加电压时，在源到漏之间的沟道没有形成，MOSFET 也处于关态。



小知识：pn 结的反偏电流

MOSFET 在关态或者截止区，电流的大小由 pn 结的反偏电流决定。pn 结的电流表示为：

$$I=I_{so}\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right] \tag{6.4}$$

式中，I 为 pn 结的电流；I_{so} 为 pn 结的反向饱和电流；q 为电子电量；k 为波尔兹曼常数；T 为温度；V 为加到 pn 结上的电压，在 MOSFET 中，V 相当于源漏电压 V_{ds}。当 pn 结反偏，p 接负，n 接正，式(6.4)的电压 $V \ll 0$ 时，pn 结的电流 $I \approx I_{so}$。而反向饱和电流 I_{so} 由半导体材料的性质、高的 pn 结势垒和宽的势垒区限制非常小。对于硅 pn 结，反向饱和电流一般在 $10^{-10} \sim 10^{-14}$ A。

3. MOSFET 的开态

栅极的电压往负方向增加，半导体表面将陆续经历平带、耗尽、反型等状态。形成反型层所加的电压为 MOSFET 的阈值电压 V_{TH}。

当栅压达到阈值电压，$V_g \geqslant V_{TH}$，表面形成反型层。继续增大栅压，半导体内反型的载流子增加，形成空穴的强反型层称为 p 沟道，即 n 型衬底的 p 沟道 MOSFET。空穴的反型层导电沟道将使漏区与源区连通，相当于在水平方向上形成了 $p^+/p/p^+$ 的形式。在漏源电压 V_{ds} 作用下形成明显的漏极电流，漏极电流的大小依赖于栅极电压，如图 6.9(b)所示。因此，MOSFET 是利用反型层工作的器件。

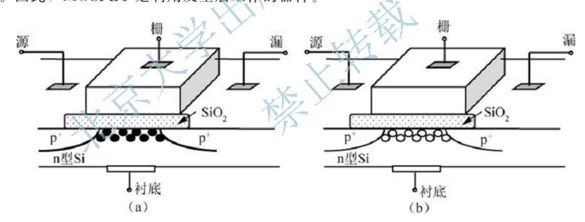


图 6.9 n 型衬底 p 沟道 MOSFET 的工作原理

当 $V_{ds}<0$ 时：(a)$V_g \geqslant 0$，电子积累，pn 结反偏，截止状态；(b)$V_g \ll 0$，空穴积累的反型层，源漏区连在一起，形成导电沟道

6.3 薄膜晶体管的工作原理

6.3.1 TFT 与 MOSFET 在结构上的差别

薄膜晶体管是利用半导体的薄膜材料在玻璃等绝缘衬底上制成的绝缘栅场效应晶体管，如图 6.10 所示。在特性与结构上与 MOS FET 有很多不同点。



（1）TFT 的衬底为玻璃基板等绝缘材料，没有衬底端子的三端子器件。

（2）MOSFET 常用 SiO_x 作为绝缘层，TFT 有很多种绝缘膜也可以采用两种不同材料的复合绝缘层。

（3）普遍采用的是非晶半导体材料，载流子迁移率低且受温度影响。

（4）积累层导电沟道，很难形成反型层。

（5）关态主要决定于半导体材料的暗电导率，关态泄漏电流大。

（6）由于存在局域态，不加栅压下器件的能带也发生弯曲，阈值电压比 MOSFET 高。

（7）阈值电压受外加电压应力及温度影响。

（8）栅源、栅漏的电容依赖于频率。

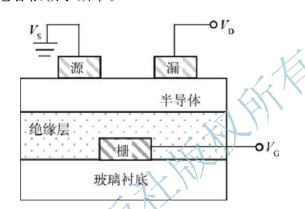


图 6.10　底栅型薄膜晶体管的结构简图

6.3.2　非晶硅半导体材料的结构与特点

市场上大多数液晶显示器采用的薄膜晶体管都是非晶硅薄膜晶体管，有源层材料是氢化非晶硅(Hydrogenated amorphous Silicon，a-Si∶H)，是一种典型的非晶态半导体材料，决定了 TFT 的某些性质不同于 MOSFET。

1. 晶体与非晶体材料在结构上的差别

图 6.11 以硅为例说明晶体与非晶体材料在结构上的差别。图 6.11(a)为非晶硅(a-Si)的结构模型，图 6.11(b)为晶体硅(c-Si)的结构模型，圆点代表晶格原子，短线代表原子间配位键。

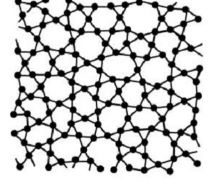
1）非晶硅材料长程无序，短程有序

晶体的结构特点是原子在空间的排列具有周期性或平移对称性称为长程有序。非晶材料在电学及光学性质上也是具有一定禁带宽度的半导体材料。在物理结构上原子在空间的排列不具有周期性，但在近邻和次近邻等极小的范围内原子的相对位置有一定的规律，存在长程无序，短程有序的特点的半导体称为非晶半导体。非晶硅是由一些稍被扭曲的单元随机连接而成的，单元与单元之间不存在固定的位形关系。

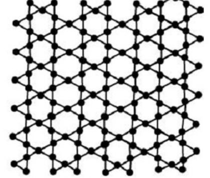
2）配位数相同，非晶硅的键长和键角略有改变

用配位数、键长及键角等结构参数来对比非晶硅与晶体硅两种材料。两者具有相同的配位数。晶体硅材料的键长和键角在任意位置都相等及相同。非晶硅材料键长和键角略有改变，且键角在不同的观察点有一定的涨落。非晶材料中原子排列长程周期性和对称性的消失，正是由于键角畸变和单元间随机连接的结果。

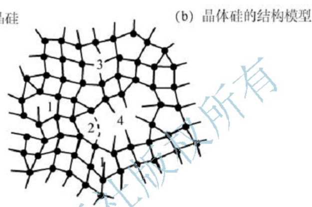




(a) 非晶硅



(b) 晶体硅的结构模型



(c) 非晶硅中的主要缺陷

图 6.11　非晶硅和晶体硅的结构模型以及非晶硅中的主要缺陷

1-悬键；2-弱键；3-空位；4-微孔

小知识：配位数、键长、键角的定义

配位数是指任意选定的一个参考原子的最近邻原子数目。键长是指参考原子与其最近邻原子的距离。键角是确定各最近邻原子分布位置的方位角。

3）非晶硅中存在一些缺陷

非晶硅材料中存在着几种常见的缺陷，如悬键、弱键、空位、微孔等，如图 6.11(c) 所示。悬键是指非晶硅的正常配位数未得到满足时的一种成键状态，是非晶硅网络中最简单，也是最重要的结构缺陷。硅有 4 个价电子，按(8－N)法则正常配位数为 4。当某个中心硅原子的周围只有 3 个电子与之形成共价时，有一个电子没有形成共价键就会产生一个悬键。非晶硅中也会出现各种空位和微孔。空位和微孔不仅仅是多个悬键的简单聚集，还为弱键的产生以及弱键与悬键间的转化创造了条件。弱键是由同一空位或微孔中的两个相邻悬键配对而成的。

2. 非晶硅的缺陷态密度

非晶硅半导体中含有大量的缺陷态密度，其中缺陷态的主要来源是悬键的非晶硅原子，大量的悬挂键等缺陷态密度一般高达 $10^{19}\,cm^{-3}$，而一般掺杂浓度约在 $10^{17}\sim10^{18}\,cm^{-3}$ 之间。于是一般的掺杂方法无法改变非晶硅薄膜的导电类型，费米能级发生“钉扎效应”。

降低缺陷态密度的有效方法是在无规网络中引入某一种重配位的原子来补偿悬键，如

氢和氟等。硅原子的未成键轨道将与补偿原子的外层电子轨道相杂化，生成价带深处的成键态和导带边的反键态，从而使缺陷态密度降低。通常将含氢和氟的非晶硅称为氢化非晶硅(a-Si:H)和氟化非晶硅(a-Si:F)。通常在有源矩阵液晶显示器中所用的非晶硅均是氢化非晶硅，是一种弱 n 型的半导体材料，电子迁移率约为 0.4～1cm²/Vs。

用 H、F 或 C1 等一价元素与悬挂键结合，缺陷态密度显著下降至 $10^{16}\ cm^{-3}$ 或更少，为实现掺杂提供条件，也可以用掺杂的方法控制导电类型及电阻率。a-Si:H 的掺杂是非晶硅材料在技术上的一大突破，扩展了非晶硅的应用范围。

小知识：费米能级的钉扎效应

在半导体材料中，费米能级的位置随掺杂而变化。费米能级的钉扎效应是半导体物理中的一个重要的概念，是指费米能级的位置不随掺杂而变化的效应。产生费米能级钉扎效应的原因是半导体材料中存在很多的缺陷，即使掺杂很多的施主或者受主，杂质也不能被激活不能提供载流子，费米能级位置始终不变。如宽禁带半导体(GaN、SiC 等)、非晶态半导体等往往存在费米能级的钉扎效应。

3. 非晶硅的状态密度

状态密度也是半导体物理中的一个重要的概念，是指在能带中能量 E 附近每单位能量间隔内的量子态数。每个能量状态有两个自选方向相反的量子态，而每个量子态最多只能容纳一个电子。导电底附近单位能量间隔内的量子态数目随着电子的能量增加，按照抛物线关系增大。电子能量越高，状态密度越大。价带顶也一样。

晶态半导体导带和价带的状态密度 $g(E)$ 如图 6.12(a)所示，两个能带中的状态均为扩展态(布洛赫态)，E_c 和 E_v 分别表示导带底和价带顶。处于扩展态中的电子可以在整个材料中运动，可参与导电并有较高的迁移率。

非晶硅是一种非晶态半导体，属于无序系统，电子的本征波函数不是布洛赫函数。安德森在 1958 年关于无序系统电子态的论文中证明，无规势可以导致电子状态的局域化。莫特也提出当无序程度低于临界值时，局域状态的存在。因此，非晶硅能带中的状态可以分为两种，一种是位于带顶和带底附近形成带尾的状态(局域态)；另一种是位于能带中部的态(扩展态)，如图 6.12(b)所示。

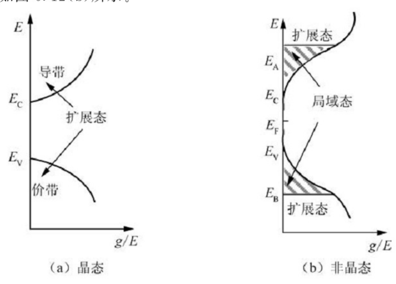


图 6.12　晶态和非晶态半导体的状态密度分布



价键饱和的理想非晶态半导体的状态密度 $g(E)$中，E_c 和 E_v 分别表示导带底和价带顶。而 E_A和 E_B分别表示导带和价带的迁移率边，两者之间的能量间隙称为迁移率隙，带尾占迁移率隙的一小部分。迁移率隙内的电子状态都是局域态，在 0K 时迁移率为零。局域态的波函数局限在某一中心附近，电子从一个局域态到另一个局域态的转移需要声子的协助，运动是跳跃式的，这种跳跃式导电的迁移率很低。非晶硅薄膜晶体管大多数情况下都是利用处于局域态的载流子跳跃式导电的。

4. 晶体与非晶材料在导电上的差别

非晶硅材料的特点决定了非晶硅在载流子导电上与单晶硅不同。

(1) 非晶硅中费米能级通常是“钉扎”在带隙中，不随掺杂而变化，也基本上不随温度变化。

(2) 非晶硅的迁移率比单晶硅低 2～3 个数量级。

(3) 非晶硅在氢化后，禁带宽度将随着氢化程度的不同可在 1.2～1.8eV 之间变化，而单晶硅具有确定的禁带宽度。

(4) 非晶硅存在扩展态、带尾局域态、带隙中的缺陷态，这些状态中的电子都可能对导电有贡献。

(5) 非晶硅的光吸收边有很长的拖尾，而单晶硅的光吸收边很陡。

6.3.3　薄膜晶体管的工作原理

非晶硅属于弱 n 型半导体，主要处于局域态，跳跃式导电迁移率低，使得薄膜晶体管的工作原理类似 MOSFET，但不同于 MOSFET。

1. TFT 的两个电场

TFT 的中心也是由栅极、绝缘膜、半导体构成的一个 MIS 结构。两边的源漏电极通过欧姆接触层与半导体材料接触。在栅极与半导体之间加电压形成垂直的电场。在源漏电极之间加电压，在半导体层上形成水平的电场。

2. TFT 的关态

当栅极上不加电压时，在源到漏之间沟道没有形成，TFT 处于关态。

当栅极施加负电压，$V_{GS} \leqslant 0$ 时，弱 n 型半导体中排斥电子，沟道内依然没有载流子，即使在源极和漏极加电压，在沟道内也没有电流流动，仍处于关态，如图 6.13(a)所示。

由此，TFT 的关态由半导体薄膜决定。a-Si∶H 薄膜是一种弱 n 型半导体，没有掺杂，半导体的费米能级也不在禁带中心而是在禁带中央稍微高点的地方，导致了材料本身有一定的电导率称为暗电导率。由暗电导引起的电流称为关态电流。由此，关态电流与费米能级的位置有关，费米能级的位置越高，关态电流越大。同样，降低 a-Si∶H 薄膜的暗电导率可以减小 TFT 的关态电流。

3. TFT 的开态

当栅极施加正电压，$V_{GS} \geqslant 0$ 时，在绝缘层与 a-Si∶H 层的界面附近，非晶硅半导体一侧感应出等量异号的负电荷形成电子的积累，如图 6.13(b)所示。当栅压增加到足够大，积累的电子增多可以形成导电沟道，这个电压称为阈值电压。当 $V_{GS} \geqslant V_{TH}$，漏源加电压

V_{DS}时，就会有电流从沟道流动为 TFT 的开态。

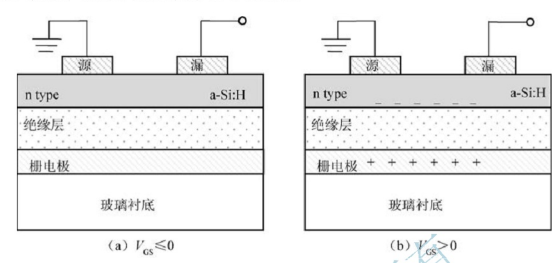


图 6.13　TFT 的工作原理

由于非晶硅在禁带中存在大量的缺陷态，致使 a-Si TFT 的迁移率很低，开态电流很小，阈值电压高。一般非晶硅 TFT 开态电流比 MOSFET 低了 3～4 个数量级。表 6－1 列出了显示器件中非晶硅 TFT、低温多晶硅 TFT 和 MOSFET 的特性对比。

表 6－1　在显示器件中常用的 TFT 与 MOSFET 性能的对比

参数		非晶硅 TFT	低温多晶硅 TFT	MOSFET
特性	晶格结构	短程有序，掺氢	晶粒间界	完整的晶格
	阈值电压	1V	1.2V	0.7V
	迁移率	0.5～1cm²/Vs	>100cm²/Vs	>250cm²/Vs
	工作电压	15～25V	5～15V	5.5V
工艺	设计规则	5μm	1.5μm	0.25μm
	光刻数目	4～5 次	5～9 次	22～24 次
	栅绝缘层厚度	300nm	80～150nm	7.8nm

4．TFT 与 MOSFET 工作原理的不同

1）关态不同

TFT 源和漏极处没有形成 pn 结，关态电流是源漏之间的泄漏电流，主要是由非晶硅半导体的暗电导率引起的，关态电流大。而 MOSFET 的关态是 pn 结的零偏状态或反偏状态，关态电流小。

2）源极和漏极没有正负之分

TFT 源极和漏极正常工作情况下没有正负之分；而 MOSFET 为保证 pn 的反向偏置，有严格的源漏电极正负之分。

3）表面导电层状态不同

当栅极加正压达到一定程度时，TFT 沟道积累电子形成 n 型导电沟道。源漏电极之间加上电压就会有电流在源漏电极之间流动。因此，TFT 是 n 型半导体，能形成 n 型导

电沟道，是积累层导电而不是反型层导电。MOSFET 是反型层导电，n 型衬底形成了 p 型导电沟道。

6.4　薄膜晶体管的直流特性

TFT 在 TFT-LCD 中起着开关的作用，器件性能的优劣直接影响 TFT-LCD 图像显示的质量。对 TFT 器件性能的深入了解是 TFT 有源矩阵液晶显示器开发及阵列优化设计的基础和理论依据。

6.4.1　直流特性种类

1. 直流特性的要求

直流特性是指薄膜晶体管的输出电流随着施加电压变化的特性，又称静态特性。从实用的角度考虑，在显示器中应用的薄膜晶体管的直流特性应当满足下列 3 条基本要求。

1）较高的开关比

开关比 I_{on}/I_{off}指的是开态电流和关态电流的比值，要求越高越好，其值一般须$\geqslant 10^6$。

2）较高的迁移率

电子的迁移率定义为单位场强下电子的平均漂移速度，单位为 cm^2/Vs，其值一般须$\geqslant 0.1cm^2/Vs$。

3）亚阈值斜率要陡峭

亚阈值斜率是指从关态到开态的电流上升的斜率，要求越陡峭越好。

用现有的工艺设备和工艺条件满足以上 3 条是比较容易的。但需要注意的是，在薄膜的制备过程中，应尽量避免杂质玷污和缺陷的生成，是制备高开关比、高迁移率以及低阈值电压的 a-Si:H TFT 器件的关键。

2. 直流特性的种类

栅极电压 V_{GS}控制着薄膜晶体的沟道是否有载流子，决定着沟道的开关。源漏电压 V_{DS}控制着沟道电流的流动。由此，根据栅极电压和源漏电压的控制情况，TFT 的直流特性分为转移特性和输出特性曲线。转移特性曲线是指在恒定源漏电压 V_{DS}下，漏极电流 I_{DS}随栅源电压 V_{GS}变化的曲线。输出特性曲线是指在恒定栅源电压 V_{GS}下，漏极电流 I_{DS}随源漏电压 V_{DS}变化的曲线。

6.4.2　TFT 的输出特性

1. 两个区域

按照漏极电流 I_{DS}随漏源电压 V_{DS}变化的规律，可以将输出特性曲线分为线性区和饱和区，如图 6.14 所示。当 V_{GS}=常数条件下，从 $V_{DS}=0$ 开始，I_{DS}随 V_{DS}线性增加的区域称为线性区；当 V_{DS}增加到一定数值以上时，I_{DS}上升速率逐渐变小，漏极电流几乎不随漏源电压变化的区域称为饱和区。

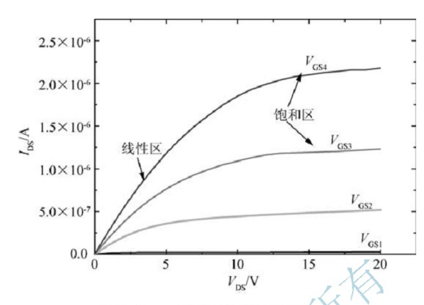


图 6.14 a-Si:H TFT 的输出特性曲线

2. 沟道夹断原理

定义 x 表示垂直于沟道的电场方向，y 表示平行于沟道的电场方向。栅极加电压 $V_{GS}>V_{TH}$(V_{TH}是阈值电压)时，源漏间形成 n 型的导电沟道。V_{GS}一定时，由于栅压 V_{GS}作用到沟道 x 方向的电场为 $V_{GS}-V_{TH}$。施压源漏电压 V_{DS}后，垂直方向的电场沿 y 方向从源端到漏端是不同的，逐渐减小的。在源端，x 方向的电场为 $V_{GS}-V_{TH}$最大；在漏端为($V_{GS}-V_{TH}$)$-V_{DS}$最小。不同的垂直方向电场，沟道内的载流子数量不同。

当 V_{DS}很小时，垂直沟道的电场沿 y 方向的变化很小，即源端和漏端的电场差别不大。漏源之间存在贯穿全沟道的导电沟道为线性区，如图 6.15(a)所示。随漏端电压增大，V_{DS}增大，漏端垂直方向的电场($V_{GS}-V_{TH}$)$-V_{DS}$变小，那么漏端的感生载流子减少。出现源端和漏端不平衡的现象，但仍为线性区，如图 6.15(b)所示。

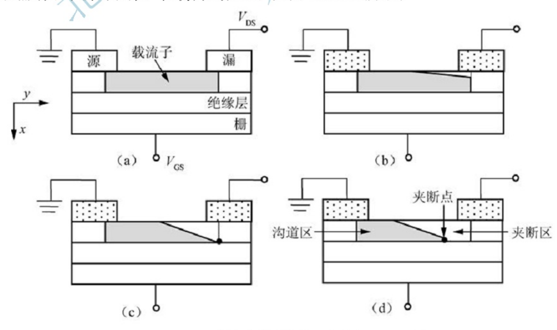


图 6.15 TFT 的输出特性线性区和饱和区原理分析



当V_{DS}进一步增大，$V_{DS}=V_{GS}-V_T=V_{sat}$时，$V_{sat}$为饱和电压，漏端垂直方向的电场为零，漏端沟道电荷减少到零，为沟道夹断，器件进入到饱和区，如图 6.15(c)所示。

当V_{DS}继续增大，$V_{DS}>V_{sat}$时，夹断点向源极移动，夹断区变大，沟道区变小。夹断区是已耗尽空穴的空间电荷区，对沟道电流没有贡献。增加的V_{DS}电压将降落到夹断区上，用于增强载流子的漂移运动。在夹断区，载流子从夹断点漂移到漏端。而沟道区内的电压始终保持V_{sat}，沟道电流几乎不变，为饱和区，如图 6.15(d)所示。

6.4.3 线性区的漏极电流

薄膜晶体管的直流特性也可用 MOSFET 的模型来得出。假设存在缓变沟道近似，其中 x 表示垂直于沟道的方向，y 表示平行于沟道的方向，z 表示沟道水平的方向。用 L 代表沟道长度，W 代表沟道宽度，如图 6.16 所示。

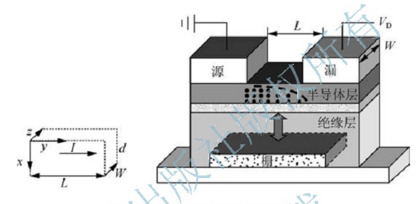


图 6.16 薄膜晶体管的立体结构图

1. 欧姆定律

在导体两侧加电压 V，内部就会形成电流，R 为导体的电阻，电流强度为：

$$I=\frac{V}{R} \tag{6.5}$$

$V-I$ 关系是直线的时候就是熟知的欧姆定律。电阻为 $R=\rho\frac{L}{s}$，电导率为 $\sigma=\frac{1}{\rho}$，电流密度为 $J=\frac{I}{s}$，由此得到：

$$J=\sigma\cdot\frac{V}{L} \tag{6.6}$$

其中电导率为：

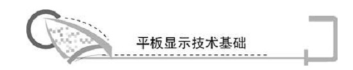
$$\sigma=\mu\cdot q\cdot n \tag{6.7}$$

2. 沟道可动电荷密度

用 $Q_m=q\cdot n$ 表示沟道表面的电荷密度。当栅压大于阈值电压时，在沟道感生的可动电荷 Q_m 与栅压 V_{GS} 有关，沿 y 方向变化。可动电荷面密度为：

$$Q_m(y)=C_{ox}[V_{GS}-V_{TH}-V(y)] \tag{6.8}$$

其中 C_{ox} 为绝缘层的单位面积电容。在源端接地时，$V(y)=V_S=0$，有最大的可动电荷。沿 y 方向向漏端，可动电荷密度逐渐减少。在漏端，$V(y)=V_D$，有最小的可动电荷密度。



3. 沟道电流密度

假定缓变沟道近似成立，沟道电场只是 y 的函数，与 z 无关，沿 y 方向的单位长度的电场强度表示为 $\mathrm{d}V/\mathrm{d}y$。由沟道感生的多数载流子形成的电流密度为：

$$J=\sigma\cdot\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}L}=\mu\cdot q\cdot n\cdot\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}L}=\mu\cdot C_{\mathrm{ox}}\left[V_{\mathrm{GS}}-V_{\mathrm{TH}}-V(y)\right]\cdot\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}y}\tag{6.9}$$

4. 沟道电流

感应出的载流子积累到半导体的表面，厚度 d 很小。假设欧姆定律采用一维形式，电流为：

$$I=J\cdot W=W\cdot\mu\cdot C_{\mathrm{ox}}\left[V_{\mathrm{GS}}-V_{\mathrm{TH}}-V(y)\right]\cdot\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}y}\tag{6.10}$$

分离变量得到：

$$I\cdot\mathrm{d}y=W\cdot\mu\cdot C_{\mathrm{ox}}\left[V_{\mathrm{GS}}-V_{\mathrm{TH}}-V(y)\right]\cdot\mathrm{d}V\tag{6.11}$$

对上式左端对 y 从 0 积分到 L，右端对 V 从 0 积分到 V_{DS}，得出从源到漏极的线性区的沟道电流，即漏极电流 I_{DS} 为：

$$\mathrm{I}_{DS}=\frac{W}{L}\cdot\mu\cdot C_{\mathrm{ox}}\left[(V_{\mathrm{GS}}-V_{\mathrm{TH}})\cdot V_{\mathrm{DS}}-\frac{{V_{\mathrm{DS}}}^{2}}{2}\right]\tag{6.12}$$

6.4.4 饱和区的漏极电流

进入饱和区，增加的 V_{DS} 一部分降落到夹断区对沟道电流没有作用，沟道区的电压降始终保持为饱和电压 $V_{\mathrm{Dsat}}=V_{\mathrm{GS}}-V_{\mathrm{TH}}$。漏极电流不随 V_{DS} 变化。把沟道漏端夹断时的饱和电压代入到线性区电流公式(6.12)可以得到饱和区的漏极电流为：

$$I_{\mathrm{DS}}=\frac{W}{2L}\cdot\mu\cdot C_{\mathrm{ox}}(V_{\mathrm{GS}}-V_{\mathrm{TH}})^{2}\tag{6.13}$$

式中，I_{DS} 为漏极电流，单位是安培(A)；W、L 分别是 TFT 沟道的宽和长，单位是微米(μm)；μ 是半导体材料的场效应迁移率，单位是 $\mathrm{cm^2/Vs}$；C_{ox} 是绝缘层电容，单位是 $\mathrm{F/cm^2}$；V_{DS} 和 V_{GS} 分别为施加的漏源电压和栅源电压，单位是 V；V_{TH} 为阈值电压，单位是 V。

实际器件的饱和都是不完全的，随 V_{DS} 的增加，漏极电流 I_{DS} 略有上升。当 V_{DS} 大于 V_{Dsat} 时，沟道夹断点的电压始终都等于 V_{Dsat} 不变，超过 V_{Dsat} 的那部分外加电压 $V_{\mathrm{DS}}-V_{\mathrm{Dsat}}$ 都降落到夹断区上。当 V_{DS} 继续增大时，夹断区长度扩大，有效沟道长度 L' 缩短，由式(6.13)实际沟道电流随着 L' 的减小而略有增大。

6.4.5 TFT 的转移特性

当栅极施加电压 V_{GS} 时，在绝缘层两边会感应出等量异号的电荷。对于 a-Si∶H TFT，加正压绝缘层与半导体界面的 a-Si∶H 层一侧会感应产生负电荷。当漏源加电压时，沟道内就会有电流流过。负压沟道内没有载流子。那么，测试在恒定源漏电压 V_{DS} 下，漏极电流 I_{DS} 随栅源电压 V_{GS} 变化的转移特性曲线会经历关和开的状态。关态和开态的电流差别很大，一般用半对数图表示，如图 6.17 所示。该半对数图是横坐标为线性，纵坐标为对数的曲线图。



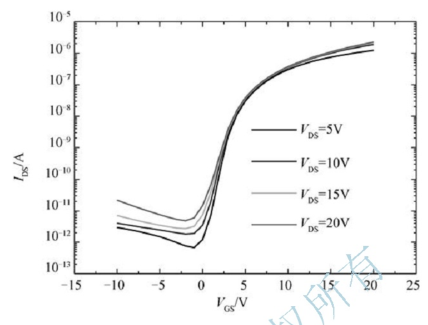


图 6.17　a-Si:H TFT 的转移特性

根据栅极电压的变化，转移特性曲线可以分为 4 个区域：截止区、亚阈值区、饱和区、线性区，如图 6.18 所示。

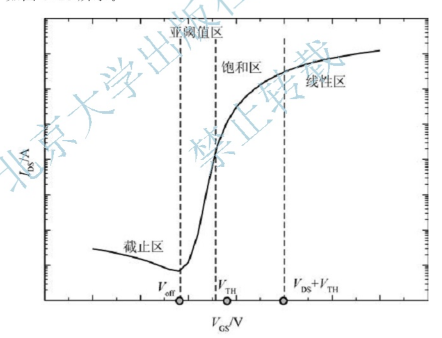


图 6.18　转移特性区域的划分

1. 线性区和饱和区

线性区和饱和区的划分来源于输出特性。在输出特性上，$V_{DS}<V_{GS}-V_{TH}$时为线性区；$V_{DS}\geqslant V_{GS}-V_{TH}$时为饱和区。在转移特性上，线性区为 $V_{GS}>V_{DS}+V_{TH}$，饱和区为 $V_{TH}\leqslant V_{GS}\leqslant V_{DS}+V_{TH}$。其中，$V_{TH}$为阈值电压。

高于阈值电压进入到饱和区，TFT 是开态，导电沟道形成。导带尾更接近费米能级，

导带中形成栅极电压感应的电子积累层，参与导电的电子增多，TFT 形成一个很高的漏极电流(μA)。因此，阈值电压 V_{TH} 也可以定义为导带尾移动到费米能级处的栅极电压。在这个区域，导带尾态中的电子密度比深态和界面缺陷态中的电子密度要高得多。

2. 亚阈值区

亚阈值区为 $V_{off}<V_{GS}<V_{TH}$。V_{off} 为关态电压。对于 a-Si∶H TFT，在亚阈值区，高于关态电压，如栅极加正压时，沟道随栅压的增加积累电子，电子的密度也增加，电流呈指数形式急剧增加。但漏极电流受界面态中缺陷态数量和 a-Si∶H 禁带中深的类受主局域态的影响，感应出的大部分电子都被局域态和 a-Si∶H/绝缘层界面缺陷态所俘获，只有一小部分电子参与导电，因此，在亚阈值的电流很小，大约为 $10^{-12}\sim10^{-8}$ A。

3. 截止区

截止区为 $V_{GS}\leqslant V_{off}$，电流为泄漏电流，或者称为关态电流，是电场增强使得深缺陷态中的载流子激发出来造成的，将影响 TFT 关断状态下液晶显示器的显示效果。

6.5 薄膜晶体管的主要参数

薄膜晶体管的主要参数有开态电流、关态电流、开关比、迁移率、阈值电压、亚阈值斜率等都可以从器件的直流特性中获得，且每个参数的影响因素也不同，下面分别介绍。

6.5.1 开态电流

1. 开态电流的提取

用于视频显示的 TFT-LCD 有两个重要的显示参数：像素的充电速率和像素电荷的保持率。充电速率与 TFT 器件的开态电流 I_{on} 有关，在 a-Si∶H TFT 开关器件处于开态时，要求图像信号能快速地写入到对液晶像素上，保证对图像信号的正确显示。因此，TFT 开关器件要具有较高的开态电流 I_{on}。开态电流可以从转移特性曲线中的线性区获得。如图 6.17 所示，开态电流约为 10^{-6} A。

2. 开态电流的影响因素

从公式(6.12)可知，a-Si∶H TFT 开态电流与沟道宽长比 W/L、绝缘层电容 C_{ox}、半导体的迁移率 μ 以及外加电压有关。实际上与器件的结构设计、a-Si∶H 材料性能等有关。

1）载流子迁移率的影响

从材料特性的角度看，TFT 器件的载流子迁移率越大，开态电流越大。迁移率的大小与 a-Si∶H 材料中的隙态密度分布、SiN_x/a-Si∶H 界面态特性有关。因此，优化 a-Si∶H 和 SiN_x 材料的制备工艺，获得隙态密度低、缺陷少的优质薄膜材料，改善 SiN_x/a-Si∶H 的界面特性可使开态电流得到有效的提高。同时，a-Si∶H 材料隙态密度的降低以及 SiN_x/a-Si∶H 界面特性的改善，会使 a-Si∶H TFT 器件的阈值电压降低，也有利于开态电流的提高。

2）绝缘层电容的影响

开态电流的大小与栅绝缘层的电容大小有关，栅绝缘层电容与 SiN_x 绝缘层的介电常数成正比关系。N/Si 比的变化对 SiN_x 材料的性能影响很大，对 SiN_x 绝缘材料的介电常数一般影响很大。

3）结构设计的影响

优化器件结构也可以提高开态电流。宽长比 W/L 越大，开态电流越大。大的宽长比要求设计短而宽的沟道，但是沟道长度的缩小受到工艺条件的限制，而沟道宽度的增大又会影响到像素的开口率。

从 C_{ox} 的定义可知，增大绝缘层面积和减小绝缘层厚度可提高 C_{ox}，进而提高开态电流。但是绝缘层面积增大使 TFT 器件面积增大像素开口率降低；绝缘层厚度的减小同时受到绝缘层绝缘性能和击穿强度的限制。因此通过器件结构的设计来提高开态电流应综合考虑各方面的因素，在不影响其他性能的情况下尽可能提高器件的开态电流。

6.5.2 关态电流

1. 关态电流的提取

TFT-LCD 另一个重要的显示参数是像素的保持率。像素电荷的保持率与 TFT 器件的关态特性有关，TFT 关态电阻越大，关态电流 I_{off} 越小，像素电荷的维持时间越长。关态电流可以从转移特性曲线中截止区获得。如图 6.17 所示，关态电流约为 10^{-12} A。开态电流与关态电流之比称为开关比，如图 6.17 所示，开关比$>10^6$。

2. 关态电流的影响因素

TFT 关态电流是栅极不加电压或者加相反电压下沟道内的泄漏电流，是决定保持特性的重要因素，与很多因素有关，如图 6.19 所示。

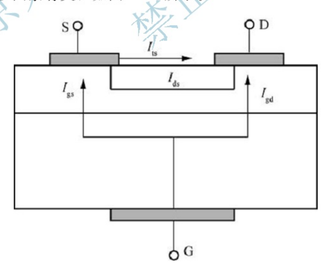
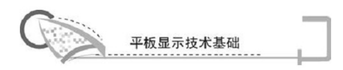


图 6.19 TFT 中关态泄漏电流影响因素

1）有源层上表面的泄漏电流

I_{ts} 为有源层上表面的泄漏电流，由 ITO 膜刻蚀不均匀而形成的残留物所致。另外，有源层表面清洗不干净以及灰尘污染也是 I_{ts} 的一个主要来源。因此，I_{ts} 可通过良好的清洗和刻蚀工艺加以减小和避免。



2）有源层的暗态泄漏电流

I_{ds}为有源层的暗态泄漏电流，与 a-Si∶H 材料的暗态电导率有关。优化制备工艺条件，制备出低隙态密度、缺陷少、宽带隙、低电导激活能的 a-Si∶H 材料可有效降低本征电导率。还与器件结构的设计有关，如宽长比 W/L、有源层的厚度 d 等，减小 W/L 的比值以及采用较薄的有源层厚度有利于降低电导率，是减小关态电流的有效途径。

3）栅绝缘层的泄漏电流

I_{gs}和 I_{gd}分别为栅与源、漏电极之间通过栅绝缘层形成的泄漏电流，是由 SiN_x 绝缘层内过多的缺陷态以及 a-Si∶H/SiN_x 界面处应力不匹配而产生的界面态导致的。因此制备优质的 SiN_x 薄膜和改善 a-Si∶H/SiN_x 的界面特性是减小 I_{gs}和 I_{gd}的有效手段。同时，采用双栅绝缘层也可以起到降低栅绝缘层的泄漏电流，降低 TFT 的关态电流。

6.5.3 迁移率和阈值电压

1. 迁移率和阈值电压的提取

迁移率和阈值电压都可以从转移特性曲线中利用线性外推法或平方外推法提取。线性外推法是利用线性区的漏极电流公式(6.12)对转移特性曲线的线性区拟合，从外推曲线的斜率可以提取出迁移率 μ，从外推曲线与栅电压轴的交点可以提取阈值电压 V_{TH}。

平方外推法是利用饱和区的漏极电流公式(6.13)对转移特性曲线的饱和区做 $I_{DS}{}^{1/2}\sim V_{GS}$曲线，并对直线段进行拟合，从外推曲线斜率可以提取出迁移率，从外推曲线与栅电压轴的交点可以提取阈值电压 V_{TH}。

在转移特性曲线的线性区，栅压较大，载流子迁移率受到其他因素的影响很大，所以用线性外推法提取的误差要大些。但平方外推法不适用短沟道器件。这两种方法都要受到源漏接触电阻的影响。一般沟道尺寸的器件常用平方外推法来提取迁移率和阈值电压。这里只介绍平方外推法。

2. 平方外推法

对转移特性曲线的饱和区做 $I_{DS}{}^{1/2}\sim V_{GS}$曲线，如图 6.20 所示。取测试获得的固定 V_{DS}下的一条转移特性曲线，对漏极电流开根号取直线段部分，进行线性拟合，从拟合曲线的斜率 B 和截距 A 来提取迁移率和阈值电压。对饱和区的漏极电流式(6.13)开根号得到：

$$\sqrt{I_{DS}}=\sqrt{\frac{W}{2L}\cdot\mu\cdot C_{ox}}\,(V_{GS}-V_{TH}) \tag{6.14}$$

因此，斜率 B 和截距 A 为：

$$B=\sqrt{\frac{W}{2L}\cdot\mu\cdot C_{ox}}\qquad A=-B*V_{TH} \tag{6.15}$$

由此，迁移率和阈值电压为：

$$\mu=\frac{2B^2}{(W/L)C_{ox}}\qquad V_{TH}=-\frac{A}{B} \tag{6.16}$$

式中，B 和 A 是从拟合曲线中得到的；W 和 L 是器件的沟道宽和长，是设计值；C_{ox}是绝缘层电容，是设计值。



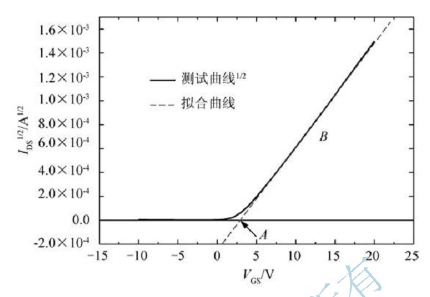


图 6.20　转移特性曲线的 $I_{DS}^{1/2} \sim V_{GS}$ 曲线

3. 影响因素

a-Si∶H 为弱 n 型半导体，载流子为电子。由于电场的作用，载流子受到的散射作用加强，不同的散射机理都同时影响载流子的迁移率。目前工业化的 a-Si∶H TFT 器件的迁移率为 0.4～1cm²/Vs。

a-Si∶H TFT 的阈值电压 V_{TH} 为 TFT 开启时的栅极电压，也是 a-Si∶H TFT 作为开关器件的一个重要参量。a-Si∶H TFT 器件的阈值电压一般为 3V 左右。

6.5.4　亚阈值斜率

亚阈值区是 TFT 从关态过渡到开态的一个过渡区，漏极电流呈指数形式从低的关态电流(pA)到高的开态电流(μA)过渡。用亚阈值斜率表示，从关态到开态的指数变化部分斜率的倒数，单位是 V/dec，是漏电流增加一个数量级对应的栅压大小。要求越小越好，越小曲线越陡，从关态到开态变化的过程就越短。

1. 亚阈值斜率的提取

亚阈值斜率(S)可以从对数坐标下的转移特性曲线中提取。在对数坐标下，对亚阈值区进行直线拟合，拟合的直线斜率为 B，亚阈值斜率 S 为直线斜率的倒数，即：

$$S=\frac{1}{B}=\frac{dV_{GS}}{d(\log I_{DS})}(V/dec) \tag{6.17}$$

2. 亚阈值斜率的影响因素

亚阈值斜率与绝缘层电容、界面态电容及耗尽层有关，可以表示为：

$$S=\left(1+\frac{C_d+C_{it}}{C_{ox}}\right)\cdot\frac{kT}{q}\cdot\ln 10 \tag{6.18}$$

式中，kT/q 代表热电压，在室温下为 0.026eV；C_{ox} 为绝缘层电容；C_d 为半导体的耗尽层电容；C_{it} 为绝缘层与半导体的界面陷阱电容。要使亚阈值斜率的值很小，那么需要器件良好的界面，降低 C_d、C_{it}。

本章小结

薄膜晶体管是有源矩阵液晶显示器的核心器件，是一种以半导体薄膜制成的绝缘栅场效应晶体管。市场上，最常用的是非晶硅薄膜晶体管。本章采用与MOSFET对比的方法，重点讲述了薄膜晶体管的工作原理。从直流特性上介绍了薄膜晶体管的主要性能参数及提取方法。

1. 薄膜晶体管的半导体基础

非晶硅半导体材料是一种没有掺杂的半导体材料，由于存在一些缺陷，属于弱n型半导体材料。费米能级接近禁带中心线，偏向禁带中心线之上。主导薄膜晶体管工作的半导体现象是电导现象，载流子在电场下加速运动形成电流。

2. MOS场效应晶体管

薄膜晶体管是绝缘栅场效应晶体管，结构与原理和MOS场效应晶体管相似。MOSFET是栅极、衬底极、源极和漏极构成的4端器件。中心部分是一个金属(栅)-氧化物(SiO_2)-半导体(Si)组成的MIS结构。开态时利用反型层的载流子导电，关态时利用源漏pn结为零偏或反偏关闭。

3. 薄膜晶体管的工作原理

非晶硅材料具有长程无序，短程有序的特点，结构中存在一些缺陷，缺陷态密度高。大多数情况下都是处于局域态的载流子跳跃式导电的，迁移率低。当栅极施加正电压，形成电子的积累，为开态；栅极上不加电压时，没有形成沟道，为关态。

4. 薄膜晶体管的直流特性

TFT的直流特性分为转移特性和输出特性曲线。输出特性曲线分为线性区和饱和区。根据栅极电压的变化，转移特性曲线可以分为4个区域：截止区、亚阈值区、饱和区、线性区。

5. 薄膜晶体管的主要参数

薄膜晶体管的主要参数有开态电流、关态电流、开关比、迁移率、阈值电压、亚阈值斜率，都可以从器件的直流特性中提取。

本章习题

一、填空题

1. TFT是____________，是一种以半导体薄膜制成的____________。

2. 非晶硅半导体材料属于____________。费米能级接近禁带中心线，偏向禁带中心线____________。

3. MOSFET工作在____________层，n沟道MOSFET衬底材料是____________型衬底。

4. TFT 工作＿＿＿＿＿＿层，主要的半导体现象是＿＿＿＿＿＿现象。

5. MIS 结构实际上是一个＿＿＿＿＿＿，当在金属与半导体之间加电压后，在金属和半导体相对的两个面上就被充电，带上＿＿＿＿＿＿电荷。

6. TFT 的中心是由栅极、绝缘膜、半导体构成了一个＿＿＿＿＿＿。

7. 非晶硅材料具有＿＿＿＿＿＿无序，＿＿＿＿＿＿有序的特点。

8. 非晶硅材料中存在着几种常见的缺陷，＿＿＿＿＿＿、＿＿＿＿＿＿、空位、微孔等。

9. TFT 的转移特性曲线可以分为 4 个区域：截止区、＿＿＿＿＿＿、＿＿＿＿＿＿、＿＿＿＿＿＿。

10. TFT 器件要求亚阈值斜率越＿＿＿＿＿＿，从关态到开态变化的过程就越＿＿＿＿＿＿。

二、判断题

1. MOSFET 也是非常适合作为液晶显示器的开关器件的。（　　）

2. 非晶硅薄膜晶体管的迁移率比 MOSFET 更高，更适合应用到液晶显示器中。（　　）

3. MOSFET 在关态或者截止区，电流的大小由 pn 结的反偏电流决定。（　　）

4. 非晶硅半导体中含有大量的缺陷态密度，掺入氢和氟等可以降低缺陷。（　　）

5. 非晶硅半导体的导电主要是处于局域态中的电子跳跃式导电。（　　）

6. 非晶硅的迁移率比单晶硅高 2～3 个数量级。（　　）

7. TFT 的关态电流是由非晶硅半导体的暗电导率引起的，关态电流大。（　　）

8. 从 TFT 转移特性曲线可以提取迁移率、阈值电压、亚阈值斜率参数。（　　）

9. TFT 的输出特性曲线可以明显分为线性区、饱和区、截止区。（　　）

10. 沟道宽长比越大，TFT 器件的开态电流越高。（　　）

三、名词解释

薄膜晶体管、MOSFET、本征半导体、掺杂半导体、载流子、电导现象、MIS 结构、钉扎效应、阈值电压、沟道夹断、开关比、亚阈值斜率

四、简答题

1. 简述 MOSFET 与薄膜晶体管工作原理上的不同。

2. 简述非晶硅薄膜晶体管的工作原理。

3. 简述 TFT 在液晶显示器中的作用。

4. 非晶硅是哪种半导体？其能带的特点如何？

5. 非晶硅半导体有什么特点？非晶硅是哪种半导体？

6. 简述 MIS 结构表面电荷的变化。

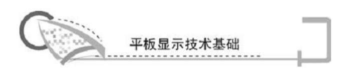
7. 简述晶体与非晶材料在导电上的差别。

8. 简述 MOSFET 的两个电场。

五、计算题与分析题

1. 分析一下主导 TFT 器件工作的半导体现象是什么？它的物理意义和主要影响参数





是什么？为提高 TFT 器件在液晶显示器中的开关作用，从半导体的角度应该提高什么？降低什么？

2. 从电导率的角度思考，如何能制作出高性能的薄膜晶体管？提高载流子浓度可以吗？

3. 假设下图 TFT 器件的宽长比为 30，绝缘层电容为 10nF/cm²，求该器件的阈值电压、迁移率、开态电流、关态电流、开关比，亚阈值斜率，以及判断该器件的半导体是 n 型还是 p 型？

